

Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra automatizace a výpočetní techniky v metalurgii

Diplomová práce

Možnosti využití mikropočítače jako regulátoru pro
laboratorní výukové účely

*Possibilities of using microcomputer as a controller for laboratory teaching
purposes*

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Tomáš Vilím

Studijní program:

N3922 Ekonomika a řízení průmyslových systémů

Studijní obor:

3902T042 Automatizace a počítačová technika v průmyslových technologiích

Téma:

Možnosti využití mikropočítače jako regulátoru
pro laboratorní výukové účely
Possibilities of using microcomputer as a controller
for laboratory teaching purposes

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popis jednotlivých typů regulátorů.
2. Využití mikropočítače pro realizaci regulátoru.
3. Realizace laboratorních úloh pro podporu výuky automatické řízení.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*. Praha: Nakladatelství BEN, 2003, 654 s. ISBN. 80-7300-020-2
2. DESILVA, C. W. *Control Sensors and Actuators*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ (US), 1989, 445 s. ISBN 0-13-171745-6
3. NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999, iv, ii, 276 s. ISBN 80-7225-030-2

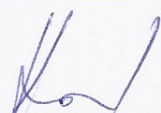
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

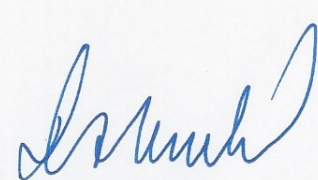
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Milan Heger, CSc.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Jaroslav Sláčala

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 23.04.2018


prof. Ing. Zora Košťálová Jančíková, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty



Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

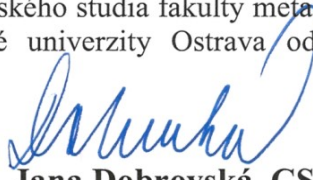
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ведо́мí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě

30.4.2018



.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování autora

Rád bych zde poděkoval svým rodičům a své přítelkyni, kteří mě za všech okolností podporovali a vytvořili mi dobré studijní a pracovní podmínky. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Milanu Hegerovi, CSc. za cenné rady, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval.

Abstrakt:

Má diplomová práce se zabývá realizací regulátoru pro laboratorní a výukové účely. Hlavní součástí mnou navrhovaného regulačního obvodu je vývojová deska Arduino MEGA 2560, sloužící jako mikrokontroler celého regulátoru. Dále je zde použit 2.4“ LCD TFT displej, který slouží jako zobrazovací a ovládací prvek. Jako regulovaná soustava byla v tomto případě zvolena jednak reálná statická soustava druhého řádu tvořena dvěma RC členy zapojenými v sérii a také dvě virtuální soustavy prvního řádu, které byly realizovány jako modely naprogramované na vývojové desce Arduino MEGA. V této práci jsou dále navrženy postupy k laboratorním úlohám, které mohou studenti realizovat ve výuce. Výsledný regulátor je navržen jako fuzzy regulátor, který může operovat ve dvou módech PI a PD. Princip práce fuzzy regulátoru je vizualizován na displeji.

Klíčová slova:

Fuzzy regulátor, PI, PD, regulace, Arduino MEGA 2560, 2.4“ LCD TFT displej, RC člen

Abstract:

My diploma thesis deals with the implementation of the regulator for laboratory and educational purposes. The main component of the proposed control circuit is the Arduino MEGA 2560 development board, which serves as a microcontroller for the entire controller. There is also a 2.4 "LCD TFT display that serves as a display and control element. As a regulated system in this case, a second-order real static system consisting of two RC members connected in series and two first-order virtual systems that were implemented as models programmed on the Arduino MEGA development board were chosen. This work also proposes procedures for laboratory tasks, which students can implement in teaching. The resulting controller is designed as a fuzzy controller that can operate in two PI and PD modes. The principle of fuzzy controller operation is visualized on the display.

Keywords:

Fuzzy control, PI, PD, regulation, Arduino MEGA 2560, 2.4" LCD TFT display, RC circuit

Obsah

1.	Úvod	- 10 -
2.	Regulátory	- 11 -
2.1	Vlastnosti spojitých regulátorů	- 12 -
2.2	Složené regulátory	- 15 -
2.2.1	PI Regulátor	- 15 -
2.2.2	PD Regulátor	- 15 -
2.3	Regulátor PID	- 16 -
2.4	Číslicové regulátory	- 17 -
2.4.1	Diskretizace PID regulátoru	- 17 -
2.5	Metody nastavení spojitých regulátorů	- 20 -
2.5.1	Ziegler-Nicholsova metoda (nastavení z kritického zesílení)	- 20 -
2.5.2	Stabilizační metoda	- 21 -
3.	Fuzzy logika	- 22 -
3.1	Míra příslušnosti	- 23 -
4.	Fuzzy regulace	- 25 -
4.1	Normalizace	- 26 -
4.2	Fuzzifikace	- 26 -
4.3	Inferenční mechanismus	- 29 -
4.4	Báze dat	- 29 -
4.5	Báze pravidel	- 30 -
4.6	Defuzzifikace	- 30 -
4.6.1	Příklady defuzzifikačních metod	- 30 -
4.7	Denormalizace	- 34 -
5.	Fuzzy regulátory	- 35 -
5.1	Mamdani fuzzy regulátor	- 35 -

5.2	Takagi-Sugeno fuzzy regulátor.....	- 35 -
5.3	Základní typy Mamdaniho fuzzy regulátoru	- 35 -
5.3.1	Fuzzy P regulátor	- 35 -
5.3.2	Fuzzy PI regulátor.....	- 36 -
5.3.3	Fuzzy PD regulátor	- 37 -
5.3.4	PID fuzzy regulátor.....	- 39 -
6.	Praktická realizace regulátoru	- 41 -
6.1	Arduino	- 41 -
6.2	Shield LCD TFT 2.4".....	- 42 -
6.3	Regulovaná soustava.....	- 43 -
6.4	Zapojení regulátoru s regulovanou soustavou	- 44 -
6.5	Softwarová realizace regulátoru	- 45 -
6.5.1	Použité fuzzy množiny	- 46 -
6.5.2	Způsoby sestrojení báze pravidel.....	- 48 -
6.5.3	Určení akčního zásahu	- 50 -
6.5.4	Volba PI nebo PD fuzzy regulace.....	- 51 -
7.	Ukázka fungování regulátoru	- 52 -
8.	Návrh laboratorních úloh.....	- 56 -
8.1	Laboratorní úloha s PD regulátorem.....	- 56 -
8.2	Laboratorní úloha s PI regulátorem	- 56 -
8.3	Návrhy další laboratorních úloh	- 57 -
9.	Závěr.....	- 59 -
	Použitá literatura.....	- 61 -
	Seznam obrázků.....	- 63 -

1. Úvod

V této diplomové práci je navrhnout a realizován fuzzy regulátor, který bude sloužit jako výuková pomůcka do předmětu „Automatické řízení“ v rámci bakalářského studia. Realizace regulátoru bude provedena na vývojové desce Arduino MEGA 2560. Deska Arduino je zvolena díky snadné dostupnosti, nízké ceně a lehké programovatelnosti. Všechny tyto vlastnosti ji předurčují k tomu, aby byla jedním z nejpoužívanějších nástrojů pro výuku po celém světě.

Tato práce si klade za cíl jasně a názorně představit studentům bakalářského studia problematiku regulace, speciálně tedy fuzzy regulace, která je díky své samotné podstatě fuzzy množin stále používanější. Studenti z této práce nejen, že mohou pochopit podstatu samotné regulace, jíž se věnuji v teoretické části, tak podstatu fuzzy regulace a fuzzy řízení, kterým se zabývám v praktické části mé práce.

Regulátor vytvořen v této práci bude sloužit výhradně pro výuku studentů, jedná se tedy pouze o jakýsi model reálného regulátoru se všemi jeho parametry, které si studenti budou moci zkusit nastavit. Tento model regulátoru bude sloužit k řízení modelů reálných systémů, které můžeme realizovat v laboratořích vysoké školy. Fuzzy regulátor navržený v této diplomové práci není určený k řízení a regulaci reálných systémů, ale je optimalizován na demonstraci řízení pouze jejich výukových modelů.

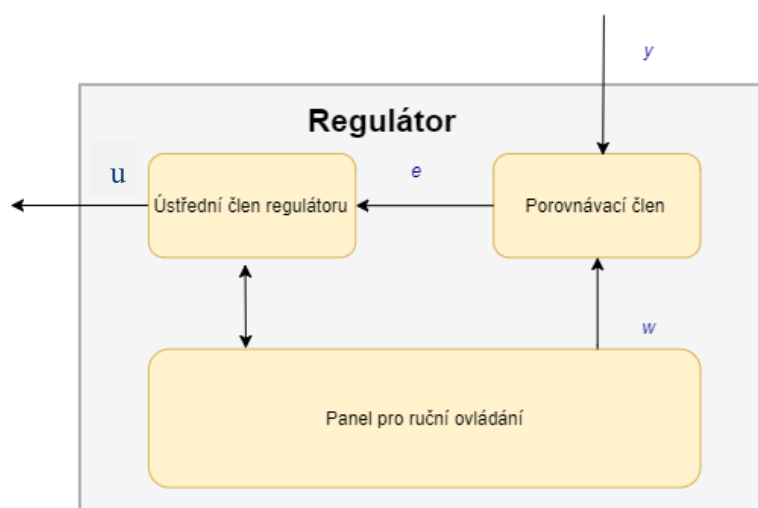
Dále jako podpora výuky jsou v poslední kapitole této práce navrženy praktické úlohy pro práci s mnou navrženým fuzzy regulátorem. Teoretický úvod a první čtyři kapitoly také mohou sloužit jako učební text a podpůrné materiály pro výuku.

2. Regulátory

Regulátorem nazýváme zařízení nacházející se v regulačním obvodu, které uskutečňuje proces automatické regulace. Jako regulátor (řídící systém) obvykle nazýváme, kromě regulované soustavy, všechny členy regulačního obvodu. Nejdůležitější funkce regulátoru zahrnuje vyhodnocení regulační odchylky (2.1) jako vstupního signálu.

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (2.1)$$

Následné zpracování této odchylky podle zákona o řízení, který je vlastní použitému regulátoru a ve vytvoření výstupního signálu, kterým je akční veličina $u_R(t)$ s cílem tak, aby odchylka $e(t)$ byla úplně odstraněna nebo aby byla co nejmenší. [1] [2]



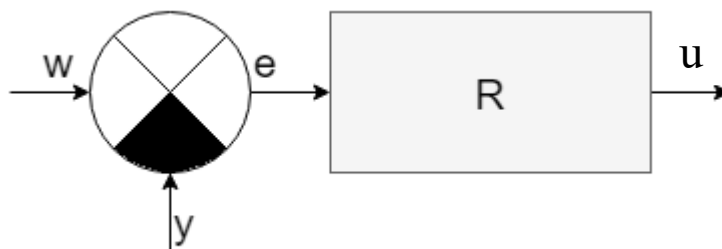
Obrázek 1 - Funkční schéma regulátoru

Existuje mnoho typů různých regulátorů, lze je však rozdělit do dvou základních skupin: regulátory, které pracují spojitě a regulátory, které pracují nespojitě. Základem nespojitých regulátorů je vstupní a výstupní signál nespojitou funkcí času, tj. obvykle v určitém časovém okamžiku dochází k náhlé skokové změně z hodnoty jedné, na hodnotu jinou, která se dále pak, až do další skokové změny udržuje konstantní. Oproti tomu

regulátory spojité, zde je výstupní a vstupní signál spojitou funkcí času, tj. může se měnit v každém časovém okamžiku. Moderní elektronické regulátory se navenek chovají prakticky jako spojité, což je způsobeno velice krátkými intervaly mezi jednotlivými zásahy, svou podstatou jsou však tyto regulátory nespojité. [1] [2]

Na obrázku 1 je znázorněno obecné funkční schéma regulátoru, platí pro všechny regulátory, které jsou realizovány jako samostatně fungující technický prvek. Na panelu pro ruční ovládání je možné zobrazovat a nastavovat hodnoty veličin u , nastavovat parametry regulátoru, přepínat ruční a automatický režim regulace a manuálně nastavovat hodnoty v . Regulační odchylku vypočtenou v porovnávacím členu podle vztahu (2.1) následně zpracovává ústřední člen. Výsledek tohoto zpracování nazýváme akční zásah, jedná se o signál, který ovládá takzvaný akční člen. Akční člen je nejčastěji složen z pohonu a regulačního orgánu. Regulační orgán řídí průtok energie řízeným systémem. Pohon dodává energii regulačnímu orgánu. Ústřední člen regulátoru zpracovává regulační odchylku podle matematického zákona, který je mu určen (např. P, PI, PD, PID apod.). [1] [2]

2.1 Vlastnosti spojitých regulátorů



Obrázek 2 - Zjednodušené blokové schéma regulátoru

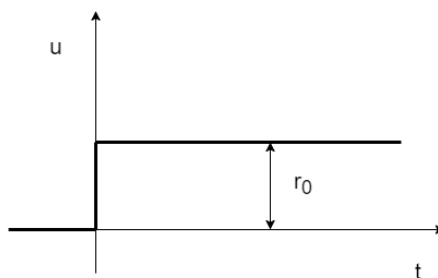
Jak již vyplývá z výše zmíněného odstavce chceme-li popisovat dynamické vlastnosti regulátoru, stačí se omezit pouze na popis vlastností jeho ústředního členu. Učiníme-li tak můžeme dále vycházet se zjednodušeného schématu na obrázku 2. Matematický popis chování běžně užívaného spojitě pracujícího ústředního členu je následující podle vztahu (2.2):

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Jde o popis chování tzv. proporcionálně-integračně-derivačního regulátoru bez zpožďujících členů neboli ideálního PID regulátoru. Ústřední člen je v tomto případě tvořen třemi komponentami: [3]

- Proporcionální složkou P, jedná se o reakci regulátoru na velikost regulační odchylky. [1]

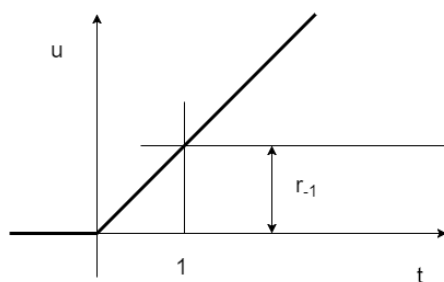
$$u = r_0 e \quad (2.3)$$



Obrázek 3 - Přejchodová charakteristika P složky

- Integrační složku I, která určuje reakci regulátoru na dobu trvání regulační odchylky. [1]

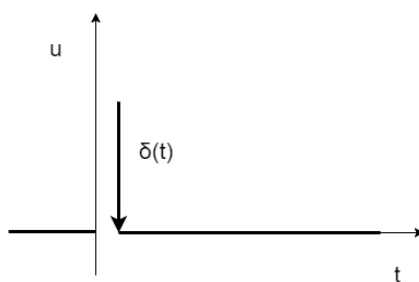
$$u = r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.4)$$



Obrázek 4 - Přejchodová charakteristika I členu

- Derivační složkou D, která určuje reakci regulátoru na rychlost změny hodnoty regulační odchylky [1]

$$u = r_1 \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$



Obrázek 5 - Přejchodová charakteristika D členu

2.2 Složené regulátory

Složené regulátory jsou tvořeny vhodnou kombinací jednoduchých regulátorů a umožňují dosáhnout vyšší kvality regulace. Ústřední člen složeného regulátoru můžeme realizovat jako paralelní spojení jednoduchých regulátorů. Výhodou tohoto způsobu je, že parametry jednotlivých složek nastavujeme samostatnými prvky, takže se navzájem neovlivňují (regulátor bez interakce), nevýhodou je vyšší počet zesilovačů. Další nespornou výhodou je i to že, odstraňují jejich nevýhody a přispívají ke stabilitě a kvalitě regulačního děje. Používané kombinace jsou PI, PD, PID. [4]

2.2.1 PI Regulátor

U PI regulátoru jsou v akční veličině zastoupeny dvě složky, proporcionální a integrační. Proporcionální je úměrná velikosti regulační odchylky a integrační jejímu integrálu. Při změně $e(t)$ do regulačního děje zasáhne nejprve proporcionální složka a teprve potom složka integrační. Oproti P regulátoru tedy pracuje bez trvalé regulační odchylky. Lze ho považovat za jeden z nejpoužívanějších regulátorů vůbec a jeho akční veličina je dána vztahem: [4]

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_i \cdot \int_{t_0}^t e(t) dt \quad (2.6)$$

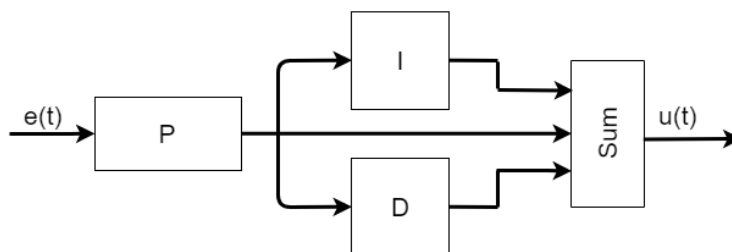
2.2.2 PD Regulátor

Podobně jako předešlý PI regulátor je PD regulátor složen ze dvou částí, proporcionální a derivační. Jedna složka regulátoru je úměrná regulační odchylce, druhá je její derivací. Při změně $e(t)$ do děje jako první zasáhne derivační složka, která celý děj nejprve urychlí, a poté zasáhne proporcionální složka, která děj stabilizuje. Jelikož zde není přítomná integrační složka, regulátor pracuje s trvalou regulační odchylkou. [4]

Akční veličina na výstupu je tedy popsána vztahem:

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2.7)$$

2.3 Regulátor PID



Obrázek 6 - Schéma ideálního PID regulátoru [1]

U PID regulátoru jsou ve výstupním signálu obsaženy všechny tři složky, které jsou úměrné velikosti regulační odchylky, jejímu integrálu a její derivaci. Při změně $e(t)$ do regulačního děje nejprve zasáhne derivační složka, poté proporcionální složka a teprve na závěr integrační složka. PID regulátor pracuje bez trvalé regulační odchylky a lze jej hodnotit jako nejdokonalejší spojitý regulátor. [2] [1]

Akční veličinu na výstupu lze proto popsat vztahem:

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt} \quad (2.8)$$

kde: $r_0 \dots$ zesílení proporcionální složky

$r_{-1} \dots$ zesílení integrační složky

$r_1 \dots$ zesílení derivační složky

Schéma ideálního PID regulátoru je na obrázku 6, tento regulátor je popsán přenosem:

$$G_R(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (2.9)$$

Nejpoužívanější průmyslové regulátory často obsahují další přídavné obvody, např. pro filtraci šumů, ruční ovladače, poruchové veličiny, beznárazové přepínání nebo obvody pro spolupráci s počítačem. Realistický regulátor proto můžeme popsat takto, např. [1]:

$$G_R(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{T_D s + 1} \right) \quad (2.10)$$

2.4 Číslicové regulátory

Jak již bylo zmíněno výše, faktem zůstává, že realizace regulátoru na konkrétním hardwaru, málokdy vede k práci se spojitými tvary pro popis činnosti regulátoru. Z důvodu tohoto nedostatku se začaly používat regulátory číslicové.

Číslicový regulátor by nám měl zajistit stejnou funkci jako regulátor spojitý, a to, že bude vstupující regulační odchylku zesilovat, integrovat a derivovat. Proto se při realizaci algoritmu pro číslicový regulátor vychází ze stejné funkce a tím i rovnice (2.10) spojitého PID regulátoru. Jeho diskrétní verze se označuje PSD a v současné době se nachází ve většině řídicích systémů. [5]

2.4.1 Diskretizace PID regulátoru

Máme spojitý regulátor se složkami P, I a D. Přenos regulátoru ve standardní formě je:

$$G(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_d s \right) \quad (2.11)$$

Přenos PSD regulátoru je dán tvary [3]:

$$G_{PSD}(Z) = \frac{d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (2.12)$$

$$G_{PS}(Z) = \frac{d_0 + d_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (2.13)$$

$$G_{PD}(Z) = d_0 + d_1 z^{-1} \quad (2.14)$$

Na základě zvolené metody můžeme stanovit koeficienty přenosu PSD regulátoru takto: [3]

	DOBD	ZOBD	LICHO
d_0	$K_P \left(1 + \frac{T_D}{T_0}\right)$	$K_P \left(1 + \frac{T_D}{T_0} + \frac{T_0}{T_I}\right)$	$K_P \left(1 + \frac{T_D}{T_0} + \frac{T_0}{2T_I}\right)$
d_1	$-K_P \left(1 - \frac{T_0}{T_I} + \frac{2T_D}{T_0}\right)$	$-K_P \left(1 + \frac{2T_D}{T_0}\right)$	$-K_P \left(1 - \frac{T_0}{2T_I} + \frac{2T_D}{T_0}\right)$
d_2	$K_P \frac{T_D}{T_0}$	$K_P \frac{T_D}{T_0}$	$K_P \frac{T_D}{T_0}$

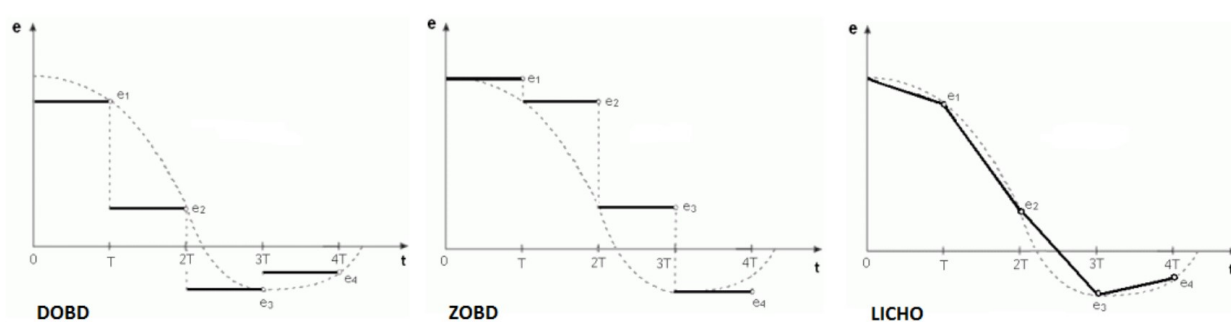
T_0 zvolená perioda vzorkování

ZOBD zpětná obdélníková metoda

DOBD dopředná obdélníková metoda

LICHO lichoběžníková metoda

Na obrázku 7 si můžeme prohlédnout, jak vypadá vzorkování signálu při použití jednotlivých metod.



Obrázek 7 - Obdélníkové metody [3]

Akční veličinu tedy můžeme vyjádřit vztahem:

$$u(k) = d_0 e(k) + d_1 e(k-1) + d_2 e(k-2) + u(k-1) \quad (2.15)$$

kde:

$e(k)$regulační odchylka

$e(k-1)$minulá regulační odchylka

$e(k-2)$předminulá regulační odchylka

$u(k-1)$...minulý akční zásah

2.5 Metody nastavení spojitých regulátorů

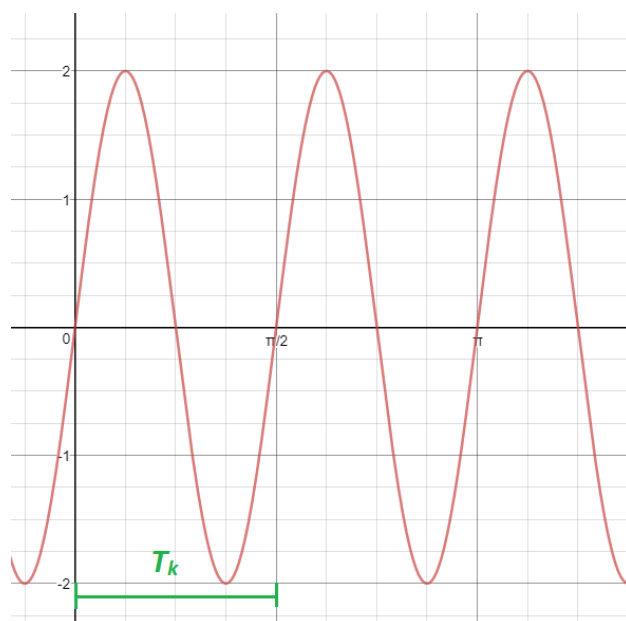
Velmi důležitým úkolem je nastavení parametrů PID regulátoru tak, aby regulační obvod fungoval správně. Především tedy aby se celý obvod choval jako stabilní a aby regulační odchylka konvergovala k nule. Tato metodologie tzv. syntézy regulátorů dominuje teorii řízení již celá desetiletí a existuje řada přístupů a filozofií, jak nastavit „ideální parametry“ regulátoru. Uvedeme zde několik nejznámějších metod nastavení parametrů regulátoru, které stále pro řadu řízených objektů zcela vyhovují. [4]

2.5.1 Ziegler-Nicholsova metoda (nastavení z kritického zesílení)

Tato metoda vznikla původně jako čistě experimentální a její postup je následující:

- 1) Použije se pouze proporcionální regulátor ve zpětné vazbě. Integrační i derivační složka u PID regulátoru budou vyřazeny z provozu, respektive vynulované.
- 2) Zvyšuje se zesílení K_P , resp. r_0 až k hodnotě K_{PK} , resp. r_{0k} tak, aby obvod byl na hranici stability \rightarrow netlumené kmity na výstupu z řízeného systému.
- 3) Odečte se perioda těchto netlumených kmitů T_K podle obrázku 8
- 4) Vhodné nastavení parametrů P, PI, PD a PID regulátorů udává tabulka:

Regulátor	K	T_I	T_D
P	$0,5 K_{PK}$	-	-
PI	$0,45 K_{PK}$	$0,85 T_k$	-
PID _{paralel}	$0,6 K_{PK}$	$0,5 T_k$	$0,125 T_k$
PID _{serie}	$0,3 K_{PK}$	$0,25 T_k$	$0,25 T_k$
PD	$0,4 K_{PK}$	-	$0,05 T_k$



Obrázek 8 - Odečtení periody netlumených kmitů při kritickém

Za hlavní výhodou této metody můžeme považovat to, že není nutno znát parametry regulované soustavy a tady není nutné provádět identifikaci. Tato metodika má však očividné nevýhody. Chceme-li ji aplikovat na systém prvního nebo druhého řádu, nebude to možné, jelikož takovýto systém nelze P regulátorem přivést na mez stability. Kromě toho při použití režimu na hranici stability může být pro mnoho technologických procesů nepřijatelné, byť jen krátkodobě. [4]

2.5.2 Stabilizační metoda

Tato metoda je považována za nejjednodušší, jelikož nevyžaduje žádné měřící přístroje. Vychází však ze značně zjednodušeného modelu procesu a její postup je následující: [6]

- 1) Použije se pouze proporcionální regulátor ve zpětné vazbě. Integrovní i derivační složka u PID regulátoru budou vyřazeny z provozu, respektive vynulované.
- 2) Zvýší se zesílení K až k mezi stability. Pak stáhněte zesílení na polovinu
- 3) Pro použití integrální části, je vhodné snížit integrační časová konstanta T_i až regulace dosáhne meze stability. Poté se zvyšuje hodnota na dvojnásobek.

3. Fuzzy logika

Fuzzy – je slovo pocházející z angličtiny, které znamená “mlhavý, nejasný, neurčitý.” Fuzzy logika (česky též mlhavá logika (fuzziness = mlhavost)) je podobor matematické logiky, který je odvozený od teorie fuzzy množin, v němž se logické výroky ohodnocují mírou pravdivosti. [7]

Liší se tedy od nejčastěji používané výrokové logiky, která zná pouze dvě logické úrovně – pravdu (označována 1) a nepravdu (označována 0). Fuzzy logika operuje se všemi hodnotami z intervalu nula až jedna, kterých je nekonečně mnoho. Patří tedy mezi takzvané vícestupňové logiky. Fuzzy logika pracuje s pojmy, které mají neostré hranice. Tyto pojmy však používáme v běžném životě. Jsou to například pojmy: menší, větší, více menší, vlažný, téměř studený apod. Nabízí se zde tedy otázka, co ještě patří do popsané množiny a co již ne. S tímto problémem se ale můžeme setkat již v tzv. Paradoxu z antického Řecka: Mějme malou hromadu kamení. Pokud přidáme jeden kámen, získáme opět malou hromadu. Tedy každá hromada kamení je malá. Jak je vidět, problém zůstává s hraničními body a použití klasických množin tedy nepřichází v úvahu. Jedním z řešení jsou právě fuzzy množiny. Fuzzy logika může být pro řadu reálných rozhodovacích úloh vhodnější než klasická logika, protože usnadňuje návrh složitých řídicích systémů. Pojem fuzzy logika se poprvé objevil roku 1965 v článku [8], jehož autorem byl profesor Lotfi A. Zadeh z Kalifornské univerzity v Berkeley. Vznikla rozvojem modifikované teorie fuzzy množin. Slovo fuzzy znamená neostrý, matný, mlhavý, neurčitý, vágní. Odpovídá tomu i to, čím se fuzzy teorie zabývá: snaží se pokrýt realitu v její nepřesnosti a neurčitosti. Je jakýmsi nástrojem pro matematický popis vágních a nepřesných pojmů. Striktní popis vede k popisu skutečnosti pouze pomocí dvouprvkové množiny $\{0,1\}$. Pokud problém nelze jednoznačně určit, rozkládá se na menší podproblémy, ale poté lze použít opět jen dvouprvkovou množinu. V případech, kdy je již nemožné nebo neúnosné takto problém rozdělit, dopouštíme se jisté chyby a tím je dán odklon od reality. V roce 1966 L. A. Zadeh ve svém článku o nových směrech analýzy komplexních systémů formuloval tzv. princip inkompatibility: "Roste-li složitost systému, klesá naše schopnost formulovat přesné a významné soudy o jeho chování, až je dosaženo hranice, za níž jsou přesnost a relevantnost prakticky vzájemně se vylučující charakteristiky." Využívá se

například v umělé inteligenci, v matematice, v logické analýze jazyka i v průmyslu (fuzzy regulátory) a v kvantové fyzice. [9] [7]

3.1 Míra příslušnosti

Jak již bylo řečeno v předcházejícím odstavci, v klasické teorii množin prvek do množiny buď patří (plná příslušnost množině) nebo nepatří (žádná příslušnost množině). Teorie fuzzy množin však zavádí pojem částečného členství. Prvek tak kromě úplného nebo žádného členství může nabývat těchto hodnot. Aby se zároveň rozlišila míra členství prvku k dané množině, zavádíme zde pojem míra příslušnosti. Funkce příslušnosti pak přiřazuje ve fuzzy logice příslušnost k množinám v rozmezí od 0 až do 1 včetně těchto hraničních hodnot. Tímto nám fuzzy logika umožňuje vyjádřit matematicky pojmy jako „hodně“ nebo „málo“. Tedy přesněji řečeno umožňuje nám vyjádřit částečnou příslušnost k dané množině. V situaci kdy prvky prostoru jsou reálná čísla, existuje více možností matematického popisu průběhu růstu, respektive klesání hodnot stupně příslušnosti. Pro prvky universa v okolí hraničních bodů by mělo platit, že čím více se blíží prvky k hraničním bodům, tím pomaleji roste (klesá) hodnota stupně příslušnosti. [10] [11]

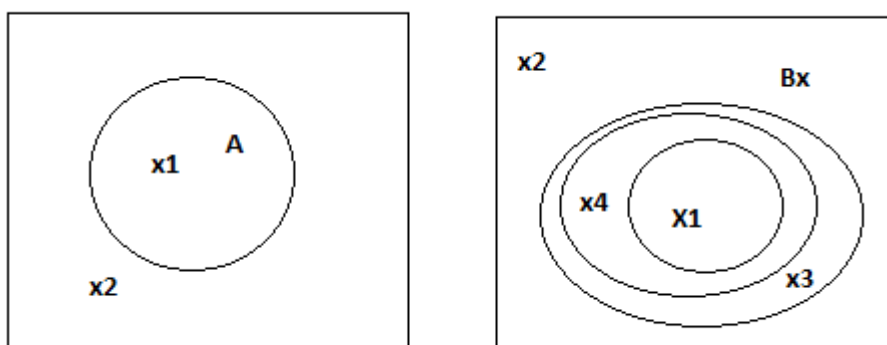
Pojmy míra příslušnosti a pravděpodobnost jsou často zaměňovány, jedná se však o pojmy zcela rozdílné. Fuzzy hodnota je přiřazena funkcí příslušnosti k vágně definovaným množinám a nepředstavuje tak pravděpodobnost nějakého jevu. Pokud prvek patří do množiny v 75% pravděpodobností, pak se v dané množině vyskytne průměrně v 75 případech ze 100, ale v každém jednom případě v množině buď je, nebo není. Naopak, pokud má prvek příslušnost k množině 75 %, znamená to, že ze tří čtvrtin do množiny patří. Takže do množiny patří vždy ale jen z části. [10]

Další vědní disciplínou, kde se zdá, že se využívá podobných principů jako fuzzy logiky, je kvantová fyzika. V ní se také počítá s tím, že mohou existovat i takové stavy, u kterých je výsledek měření předvídatelný pouze v rámci určité pravděpodobnosti. [10]

Jako demonstrativní příklad míry příslušnosti lze uvést příklad vody ve 10 litrové nádobě. Jestliže máme v nádobě pouze 3 litry vody a máme dvě definované fuzzy množiny:

Plná nádoba a Prázdná nádoba. Pak takto částečně naplněná nádoba přísluší z 0,7 k Prázdné nádobě a z 0,3 k Plné nádobě. [11]

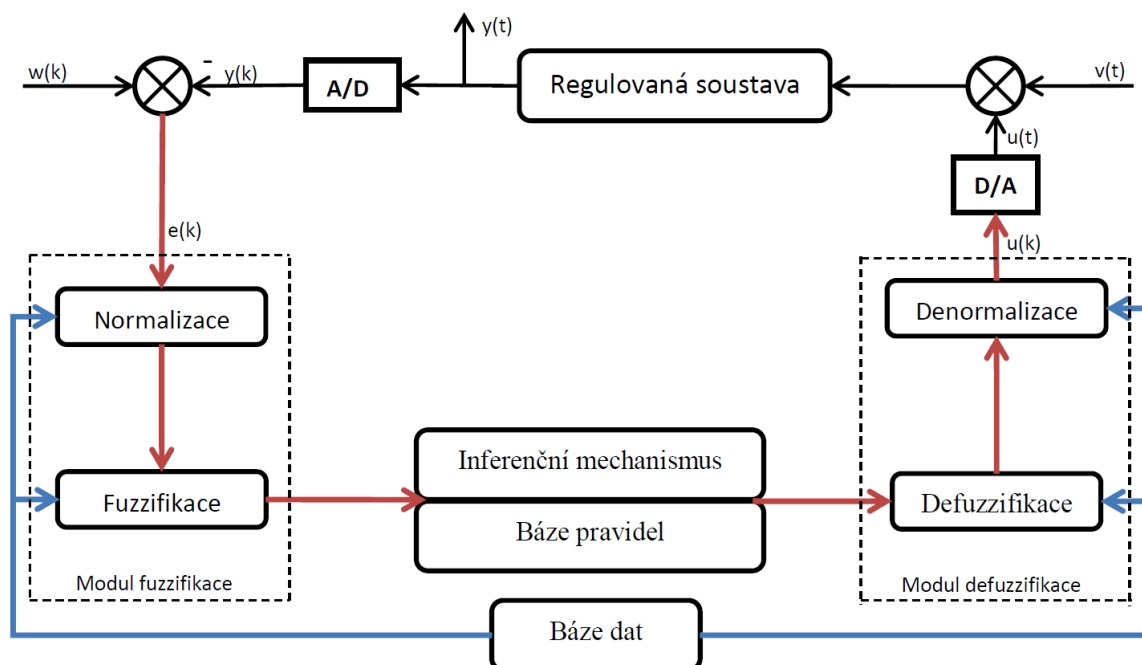
Jak již bylo zmíněno v teorii klasických množin, buď prvek x patří do množiny A (prvek x_1), anebo do ní nepatří (prvek x_2), jak je ukázáno v grafickém znázornění na obrázku 9. V případě fuzzy teorie je definicí fuzzy množiny třída Bx , která přiřazuje prvkům svého univerza x neurčitost využitím vlastnosti jejich částečné příslušnosti formou tzv. míry příslušnosti $B(x)$. Prvek x_1 do fuzzy množiny Bx zcela jistě patří a prvek x_2 určitě nepatří. Míru příslušnosti prvku x_1 v množině Bx vyjádříme hodnotou $B(x_1) = 1$ a pro další prvek x_2 bude vyjádřena hodnota $B(x_2) = 0$. Další prvky množiny x_3 a x_4 , které k fuzzy množině Bx patří zřejmě jenom částečně vyjádříme hodnotou míry příslušnosti např. $B(x_3) = 0,3$ a $B(x_4) = 0,7$.



Obrázek 9 - Srovnání klasické a fuzzy množiny

4. Fuzzy regulace

Na obrázku 10 je znázorněno schéma regulačního obvodu s detailně rozkresleným fuzzy regulátorem. Je zde znázorněn průchod a práce s daty.



Obrázek 10 - Regulační obvod s rozkresleným fuzzy regulátorem [12]

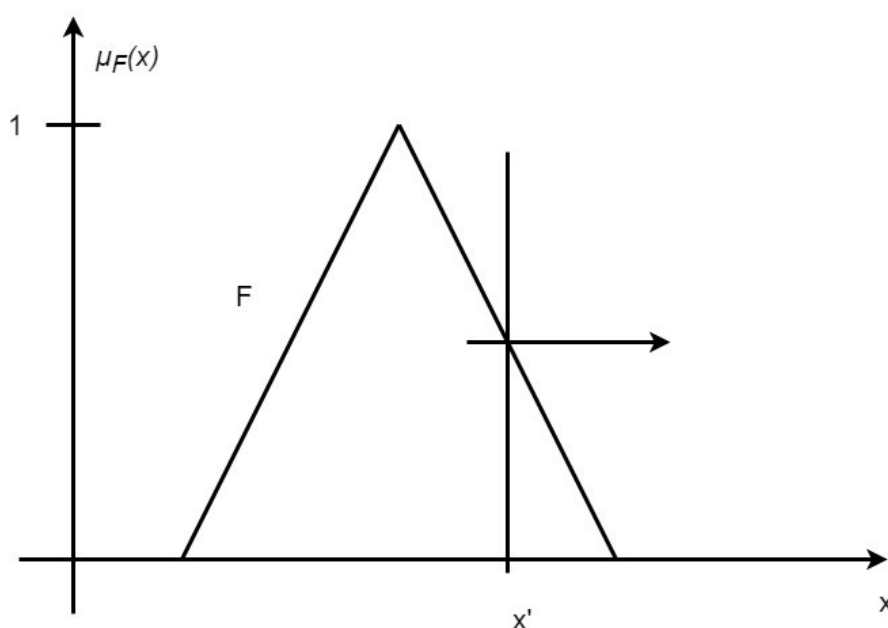
Do celého procesu vstupují data z různých systémů, nejčastěji informačních. Ta mohou být různých datových typů a podob. Prvním úkolem je tedy převést tyto hodnoty na fuzzy množiny. Tento převod se děje v tzv. modulu fuzzifikace. Poté tyto upravené hodnoty vstupují do inferenčního bloku, ten pracuje na znalostní bázi fuzzy řízení. Výsledkem celého inferenčního bloku je fuzzy množina. Tato fuzzy množina však není použitelná pro přímé řízení, proto následuje modul defuzzifikace, kde je fuzzy množina převedena na ostré hodnoty vhodné pro řízení.

4.1 Normalizace

V normalizačním bloku se převádí hodnoty vstupních veličin tak, aby odpovídaly rozsahu vstupních proměnných. Zároveň je možné změnit chování celého fuzzy regulátoru pouze pomocí změny zesílení citlivosti tohoto bloku. Není tak nutné měnit bázi dat ani bázi pravidel.

4.2 Fuzzifikace

Data po výstupu z normalizačního bloku pokračují dále do bloku fuzzifikace. Zde dochází k transformaci ostré hodnoty x' proměnné x na fuzzy množinu. Fuzzifikace v podstatě znamená, že měřené veličiny (diskrétní vstupní veličiny, které mají číselnou hodnotu) se transformují do fuzzy veličin. Proces je možné realizovat tak, že vstupní ostré číslo považujeme za fuzzy číslo se speciálním typem funkce příslušnosti, která se nazývá singleton, a toto číslo tedy náleží do množiny F s příslušností $\mu_F(x')$. [13]



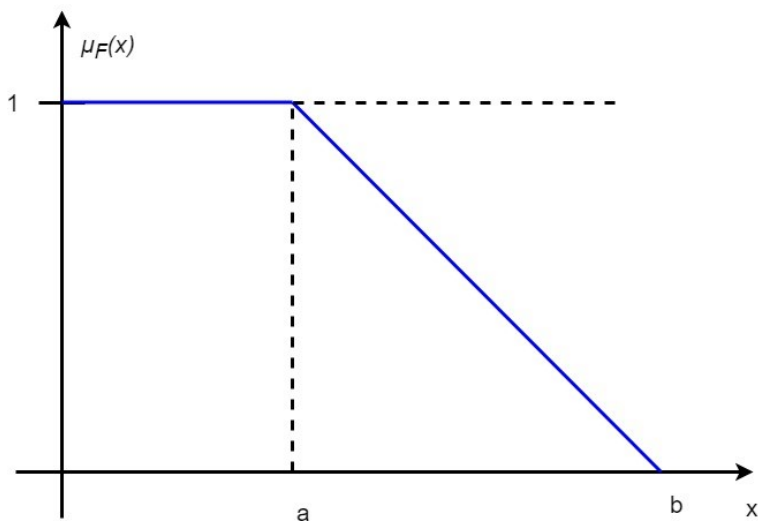
Obrázek 11 - Fuzzifikace pomocí singletonu

Pro fuzzifikaci tedy můžeme použít následující vztah:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{pro } x = x' \\ 0 & \text{pro } x \notin x' \end{cases} \quad (4.1)$$

Standartní tvary funkcí příslušnosti, které se nejčastěji používají:

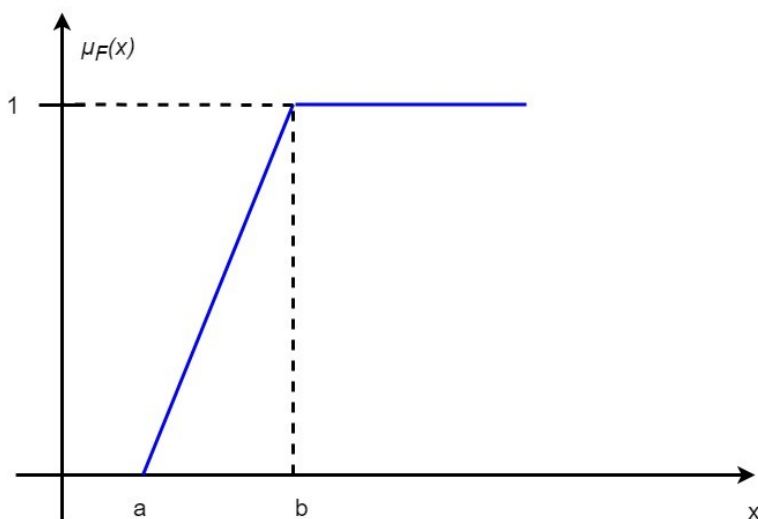
- *L-funkce*



Obrázek 12 - Tvar L-funkce

$$L(x, a, b) = \begin{cases} 1 & \text{pro } x < a \\ \frac{a-x}{b-a} & \text{pro } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{pro } x > b \end{cases} \quad (4.2)$$

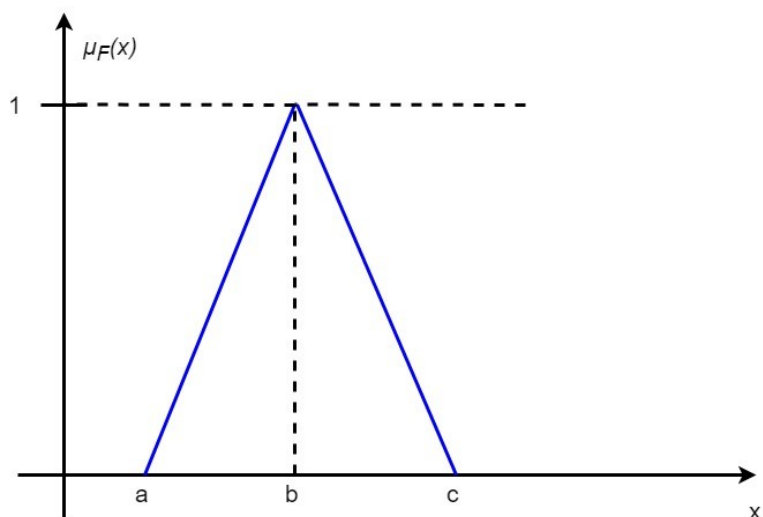
- *Γ-funkce*



Obrázek 13 - Γ-funkce

$$\Gamma(x, a, b) = \begin{cases} 1 & \text{pro } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{pro } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{pro } x > b \end{cases} \quad (4.3)$$

- Λ -funkce

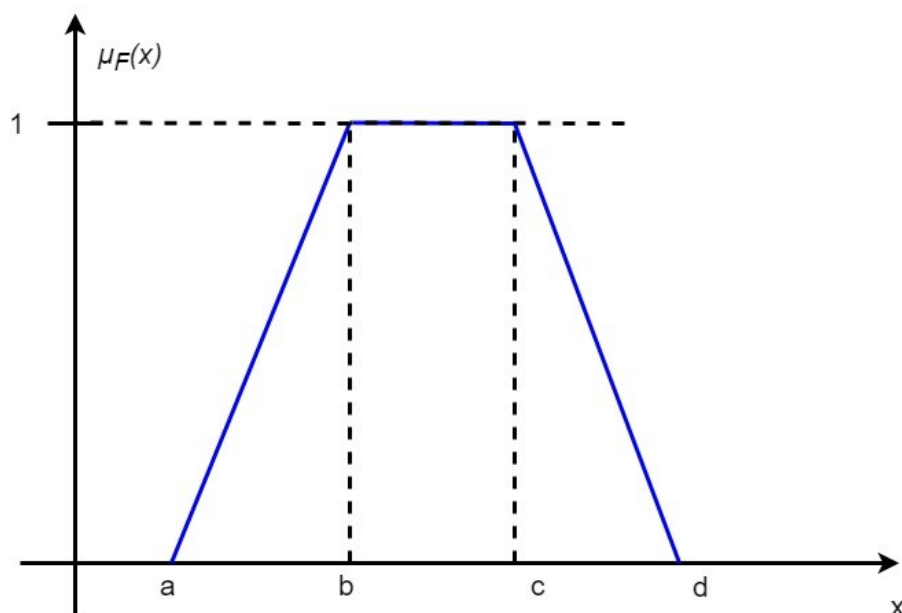


Obrázek 14 - Tvar Λ - funkce

$$\Lambda(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{pro } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{pro } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{pro } x > c \end{cases} \quad (4.4)$$

- Π -funkce

$$\Pi(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{pro } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{pro } b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{d-c} & \text{pro } c \leq x \leq d \\ 0 & \text{pro } x > d \end{cases} \quad (4.5)$$



Obrázek 15 - Tvar Π -funkce

4.3 Inferenční mechanismus

Na vstupu inferenčního mechanismu jsou nejčastěji fuzzy výroky vstupního prostoru, označme je X_i a na jeho výstupu se nachází zase fuzzy výroky výstupního prostoru Y_i . Můžeme tedy říct, že inferenční mechanismus je jakousi logickou implikací vstupních fuzzy výroků na výstupní podle pravidla *IF-THEN*, které se též nazývá produkční pravidlo. Implikace může pracovat s více vstupními prostory, které odpovídají počtu stavových proměnných použitých k řízení systému, tato implikace je nazývána vícerozměrnou. Jednotlivé fuzzy výroky na vstupu mohou být ve vztahu průniku (*AND*) nebo sjednocení (*OR*). [14]

4.4 Báze dat

Shromažďuje informace o intervalech, ve kterých se pohybuje vstupní a výstupní proměnná a také obsahuje definice všech funkcí příslušnosti fuzzy množin na těchto vstupních a výstupních prostorech.

4.5 Báze pravidel

Obsahuje strategii řízení získanou nejčastěji popisem lingvistických pravidel dodaných expertem nebo určením báze pravidel z množiny příkladů získanou měřením vstupů a výstupů a jejich převedením na pravidla za použití například zpracování vstupně-výstupních párů dat.

4.6 Defuzzifikace

Jedná se o strategii, která převede fuzzy výsledek z inferenčního mechanismu na diskrétní hodnotu výstupu regulátoru. Metod pro takzvanou defuzzifikaci existuje mnoho.

Každá z těchto metod dává odlišné výsledky výsledné ostré výstupní hodnoty. Vhodnou metodu proto volíme podle druhu aplikace. Formulace požadavků na defuzzifikaci se dá shrnout do následujících bodů: [10]

- Spojitost
- Jednoznačnost obdrženého výsledku
- Výpočetní nároky metody
- Výsledná hodnota je požadována uprostřed množiny konsekventu s co největší hodnotou stupně příslušnosti

4.6.1 Příklady defuzzifikačních metod

Metoda středu plochy (těžiště)

Metoda středu plochy COA (Center of Area), též nazýváme metoda těžiště COG (Center of Gravity) je v praxi nejpopulárnější metodou. Výslednou ostrou hodnotu veličiny určíme jako x-ovou souřadnici těžiště. Pro spojitě a diskrétní universum Y platí pro ostrou hodnotu [15]:

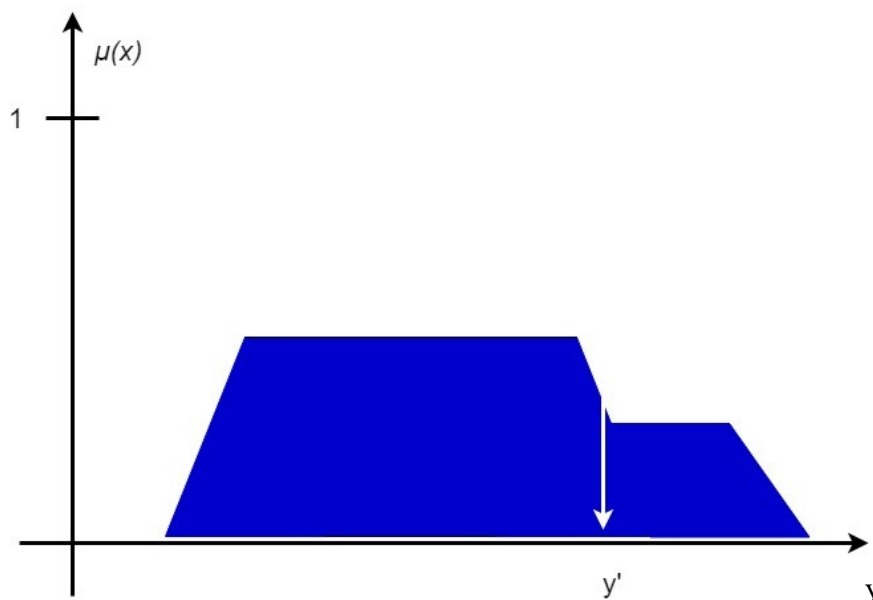
Spojitá funkce příslušnosti:

$$y' = \frac{\sum_{j=1}^m y_j \times \mu_B(y_j)}{\sum_{j=1}^m \mu_B(y_j)} \quad (4.6)$$

Diskrétní funkce příslušnosti typu singleton:

kde:

$\int_Y \mu(y) dy$ je plocha fuzzy množiny



Obrázek 16 - Metoda středu plochy

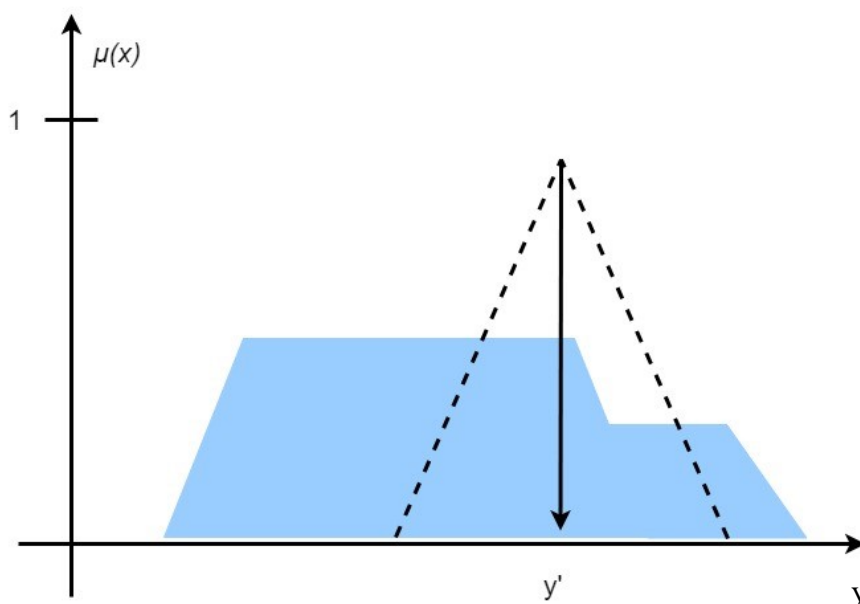
Metoda středu součtů (COS)

Tato metoda, též jinak označovaná COS (Center of Sum) slouží ke zjištění první souřadnice těžiště plochy obrazce, který je ohraničen funkcí danou funkcí příslušnosti μ_B . Můžeme říct, že se jedná o modifikaci předchozí metody. Mezi hlavní výhody této metody patří to, že je rychlá a dobře použitelná, avšak nevýhodou může být, že jsou překrývající se oblasti přidány opakovaně. Pro spojitě a diskrétní univerzum Y je obdrženo pro ostrou hodnotu [16]:

$$u' = \frac{\int_Y y \times \sum_{k=1}^r u_k(y) dy}{\int_Y \sum_{k=1}^r u_k(y) dy} \quad (4.7)$$

Spojité funkce příslušnosti:

$$y' = \frac{\sum_{j=1}^m y_j \times \sum_{k=1}^r \mu_k(y_j)}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r \mu_k(y_j)} \quad (4.8)$$



Obrázek 17 - Metoda středu součtů

Metoda průměru středů (CAM)

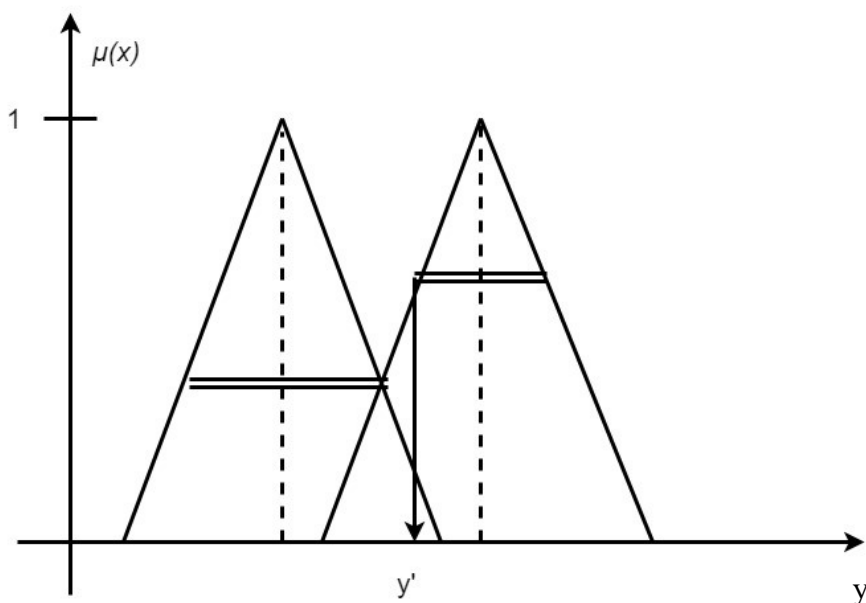
Metoda průměru středů CAM (Center Average Method) bere v potaz špičkové hodnoty (střed) každé množiny y^k , které jsou navíc váženy výškou dané fuzzy množiny $w^k = \text{hgt}(B^{(k)})$, a to pro všechna pravidla $k = 1, 2, \dots, r$. Je tedy ostrá hodnota váženým průměrem špičkových hodnot.

$$y' = \frac{\sum_{k=1}^r y^k w^k}{\sum_{k=1}^r w^k} \quad (4.9)$$

kde:

y^{-k} špičková hodnota fuzzy množiny, která se nachází v konsekventu k-tého pravidla

w^k výška daná hodnotou antecedentu tohoto pravidla



Obrázek 18 - Metoda průměru středů

Metody nejvýznamnějšího maxima

U těchto metod nás zajímá takzvané přijatelné řešení. Toto řešení by mělo být vyhovující podmínkám v rozhodovacích pravidlech. Ze všech fuzzy množin vybereme tu s největší hodnotou funkce příslušnosti a nalezneme maximum funkce, která pak svým umístěním v závislosti na zvolené metodě určí ostrou hodnotu výstupní veličiny.

- *Left of Maximum (LoM)*

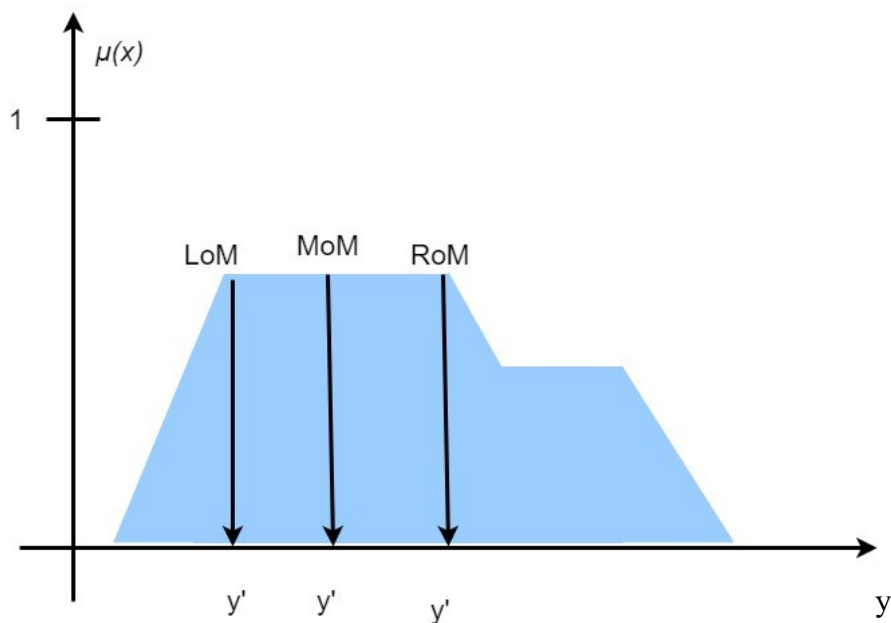
Za výsledek považujeme hodnotu nejvíce vlevo z největší hodnoty funkce příslušnosti.

- *Mean of Maximum (MoM)*

Výsledkem je ve středu položená hodnota z největší hodnoty funkce příslušnosti.

- *Right of Maximum (RoM)*

Nejvíce vpravo položená hodnota z největší hodnoty funkce příslušnosti je považována za výsledek



Obrázek 19 - Metody nejvýznamnějšího maxima

4.7 Denormalizace

Je vlastně inverzní přístup k postupu normalizace. Denormalizačnímu modulu je předána ostrá špičková hodnota, která je pomocí měřítka převedena skutečnou hodnotu řídicí informace pro informační systém.

5. Fuzzy regulátory

Fuzzy regulace používá stejné regulátory jako regulace klasická. Proto sem můžeme zahrnout typy P, PI, PD a PID. Fuzzy regulace však dělení ještě dál rozšiřuje a dělí jednotlivé regulátory podle použitého inferenčního mechanismu. Jedná se o regulátory typu Mamdani a regulátor typu Takagi-Sugeno.

Samotný fuzzy regulátor může být pouze proporcionální, protože lingvistickou aproximací lze aproximovat pouze statickou nikoliv dynamickou charakteristiku. U regulátoru s vlastní dynamikou (PD, PI) musíme příslušné proměnné vytvořit mimo fuzzy regulátor.

5.1 Mamdani fuzzy regulátor

Nejstarší a v současné době nejrozšířenější regulátor typu fuzzy. Tento model je hlavně založen na heuristických znalostech a zkušenostech obsluhy. Největší výhodou Mamdaniho regulátoru je že nemusíme znát matematické vyjádření procesu, pokud chceme sestavit regulátor, což je největší přednost tohoto regulátoru. [13]

5.2 Takagi-Sugeno fuzzy regulátor

Jde o konvenční regulátor, který též můžeme nazvat Takagi-Sugeno-Kangov (TSK) regulátor. Tento regulátor vychází z úpravy Mamdaniho regulátoru. Inferenční mechanismus tohoto regulátoru je tvořen odlišnými pravidly. Jedná se o podmíněná pravidla, ve kterých je hodnota závěru (konsekventu) vyjádřena konstantním nebo lineárním vztahem proměnných. [13]

5.3 Základní typy Mamdaniho fuzzy regulátoru

5.3.1 Fuzzy P regulátor

Jde o nejjednodušší typ, který popisuje vztah:

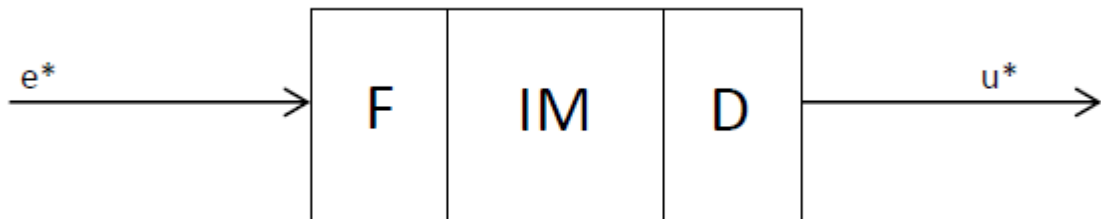
$$u(k) = K_R \cdot e(k) \quad (5.1)$$

K_R zesílení regulátoru

Jedná se o jednorozměrnou závislost s pravidly typu:

$$IF < e(k) = \{hodnota\} > THEN < u(k) = \{hodnota\} > \quad (5.2)$$

hodnota je symbolické jméno hodnoty jazykově proměnné



Obrázek 20 - Blokové schéma fuzzy P regulátoru

5.3.2 Fuzzy PI regulátor

Na výstupu z regulátoru pracujeme s derivací akční veličiny:

$$u = K_R e(k) + K_I \delta e(k) \quad (5.3)$$

kde:

K_R zesílení

K_I je integrační zisk (převrácená hodnota integrační časové konstanty).

Regulátor je často realizován tak, že s pomocí fuzzy systému modelujeme diferenci této rovnice (tj. modelujeme přírůstek akčního zásahu Δu) a na výstupu (po jeho defuzzifikaci, získání ostré hodnoty $\Delta u'$) zařadíme sumátor.

Diferenciací rovnice (5.3.) obdržíme:

$$\Delta u = K_R \Delta e(k) + K_I e(k) \quad (5.4)$$

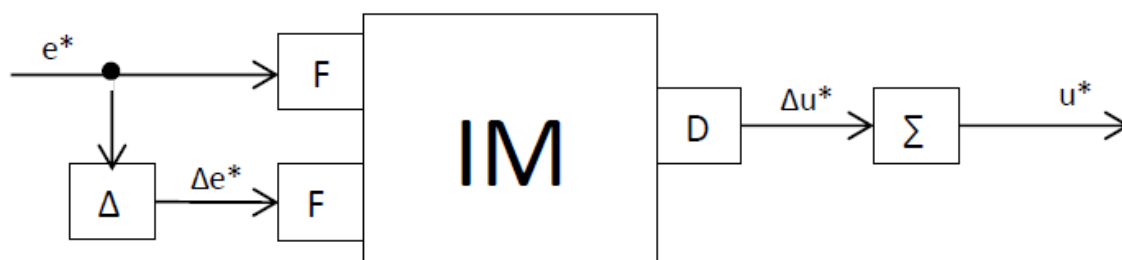
Pravidla diskrétního PI regulátoru budou mít tvar:

$$IF < e(k) = \{hodnota\} > AND < \Delta e(k) = \{hodnota\} > THEN \\ < \Delta u(k) = \{hodnota\} > \quad (5.5)$$

Výstupem tohoto regulátoru bude pouze změna akčního zásahu. Celkový akční zásah získáme jako:

$$u(k)' = u(k-1)' + \Delta u(k)' \quad (5.6)$$

Vztah (5.4) musí být realizován mimo fuzzy model tak, aby se neprojevil v inferenčních pravidlech.



Obrázek 21 - Blokové schéma PI regulátoru

5.3.3 Fuzzy PD regulátor

Vztah popisující regulátor:

$$u(k) = K_R e(k) + K_D \Delta e(k) \quad (5.7)$$

kde:

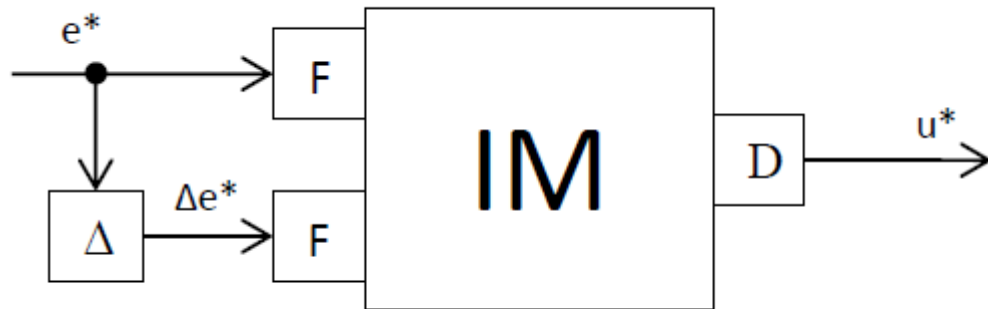
K_R zesílení

K_D derivační zisk

Vstupy regulátoru jsou odchylka a její difference

Jedná se o dvourozměrnou závislost s pravidly typu [12]:

$$\begin{aligned} IF < e(k) = \{hodnota\} > AND < \Delta e(k) = \{hodnota\} \\ > THEN < \Delta u(k) = \{hodnota\} > \end{aligned} \quad (5.8)$$



Obrázek 22 - Blokové schéma PD regulátoru

Fuzzy PD regulátor má dva vstupy odchylku $e(k)$ a její první derivaci, kterou označíme jako $\Delta e(k)$. Na rozdíl od fuzzy PI regulátoru nemá na výstupu sumu akčního zásahu. U fuzzy PD regulátoru závisí nastavení báze pravidel na typu odezvy procesu, což nebyl případ PI regulátoru. Jestliže má proces integrační charakter odezvy na jednotkový signál (nebo můžeme použít fuzzy PD regulátor kombinovaně s PI regulátorem), není nutno posouvat rozsah univerza $u \in \langle u_{min}, u_{max} \rangle$. V opačném případě je nutno si uvědomit, že pro soustavu bez integračního charakteru odezvy musí regulátor v ustáleném stavu dát akční zásah, jehož velikost závisí na zesílení procesu a žádané hodnotě. Musíme proto upravit rozsah univerza akčního zásahu $u \in \langle 0, u_{max} \rangle$ a brát ohled na konkrétní velikost akčního zásahu pro požadovanou hodnotu zesílení procesu (tím ovšem ztratíme původní jazykový význam termínů v tabulce) nebo změnit bázi pravidel. Navíc velikost akčního zásahu je nepřímě úměrná zesílení systému, což komplikuje výpočet akčního zásahu pro různé žádané hodnoty. To má za následek omezenost nastavení rozsahu žádaných hodnot. Fuzzy PD regulátor má tak horší dynamiku a větší chybu v ustáleném stavu oproti jeho ekvivalentu PD. Dále nemá fuzzy PD regulátor dobrou reakceschopnost na poruchu v ustáleném stavu.

Ve většině případů je fuzzy PD regulátor nasazen na procesy s integračním charakterem odezvy na skokový vstupní signál. Výhodou tohoto regulátoru je rychlejší reakce na změny v obvodu než u PI nebo PID fuzzy regulátorů. Reakce na poruchy, jenž působí na proces však je spolehlivá. Regulátor ve snaze zmenšit chybu začne velmi zvyšovat zesílení, což má za následek vznik kmitů a malou robustnost regulační odchylky.

5.3.4 PID fuzzy regulátor

Vztah popisující regulátor [12]:

$$u(k) = K_R e(k) + K_D \Delta e(k) + K_I \delta e(k) \quad (5.9)$$

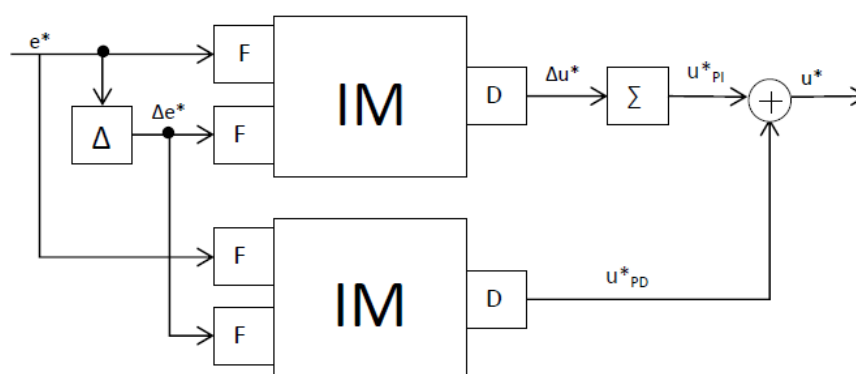
kde: K_R zesílení

K_D derivační zisk

K_I je integrační zisk

Závislost je trojrozměrná s pravidly typu:

$$\begin{aligned} IF < e(k) = \{hodnota\} > AND < \Delta e(k) = \{hodnota\} > AND < \delta e(k) \\ = \{hodnota\} > THEN < u(k) = \{hodnota\} > \end{aligned} \quad (5.10)$$



Obrázek 23 - Blokové schéma fuzzy PID regulátoru

Vzhledem k trojrozměrné závislosti může být naplnění matice pravidel obtížné. Řešení PID regulátoru v praxi probíhá jako suma paralelně zapojených PI a PD regulátorů.

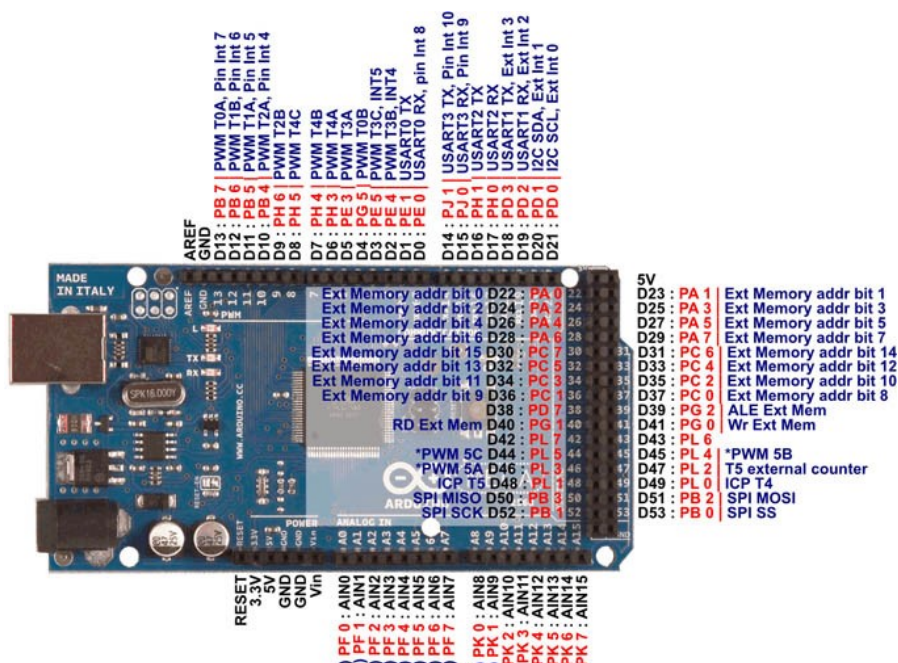
6. Praktická realizace regulátoru

Pro následnou praktickou realizaci regulátoru byl zvolen mikrokontroler Arduino MEGA 2560. Výhody použití tohoto mikropočítače jsou snadná dostupnost, nízká cena, vlastní integrované vývojové prostředí Arduino IDE. Vzhledem k následnému využití mé práce jakožto laboratorní úlohy byla zvolena právě tato snadná a dostupná metoda realizace.

V následujících kapitolách budou postupně rozebrány hardwarové a softwarové specifikace, jak regulované soustavy, tak samotného regulátoru.

6.1 Arduino

Ve své práci jsem využil vývojové desky Arduino MEGA 2560. MEGA 2560 je mikrokontrolerová deska založená na jádře ATmega2560. Na této vývojové desce se nachází 54 digitálních vstupů/výstupů, 16 analogových vstupů, 4 UARTs (hardware seriové porty), 16 MHz krystalový oscilátor, USB připojení, napájení a reset tlačítko. Na vývojové desce se také nacházejí 3x 5 V výstup pro napájení externích součástek, 10 PWM výstupů a také možnost použít 3 digitální vstupy jako analogové (44,46,45), viz obrázek 24.



Obrázek 24 - Vývojová deska Arduino MEGA 2560 s popisem jednotlivých vstupně výstupních pinů [18]

6.2 Shield LCD TFT 2.4"

Tento dotykový displej je jeden z mnoha takzvaných Arduino shieldů, zařízení, které jsou snadno kompatibilní s vývojovou deskou Arduino a rozšiřují tak funkčnost samotného mikrokontroleru. Tento LCD TFT shield s uhlopříčkou 2.4“ a rozlišením displeje 320x240px je kombinovatelný s deskou Arduino UNO, a také Arduino MEGA. Displej lze přesně zasadit do Arduina MEGA do analogových pinů A0-A5 a PWM pinů 0-13. Shield dále svými rozměry, 72 x 52 x 12 mm, nepřesahuje desku, do které je zasazen. Napájení LCD displeje, který je podsvícen 4 LED diodami, je přímo z 5 V pinů, které jsou umístěny na desce, není tak nutnost připojení externího zdroje. Mezi hlavní výhody toho displeje patří snadná dostupnost, nízká cena a snadné propojení s deskou Arduino. Nevýhodou však je velké množství řadičů, které se mohou používat pro tento rezistivní dotykový displej a velké množství knihoven, které jsou taky ne vždy kompatibilní.

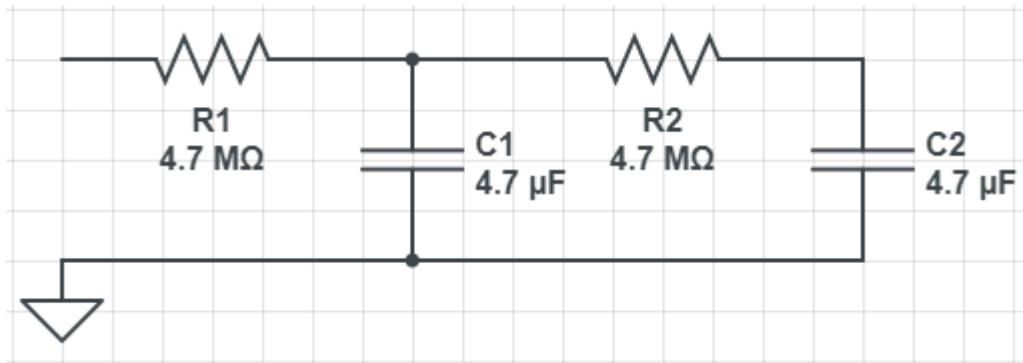
Trochu limitující pro mou práci se stala právě velikost displeje, kdy při zobrazení všech grafů a tabulek na displeji již nezbylo místo pro dotyková tlačítka a musel jsem proto využít relativně malých tlačítek nacházejících se na okraji.



Obrázek 25 - Zapojení LCD TFT shieldu do vývojové desky Arduino

6.3 Regulovaná soustava

Vzhledem k využití mé práce jako laboratorní úlohy pro studenty předmětu „Automatické řízení“ byl zvolena jako regulovaná soustava, statická soustava druhého řádu s RC členem.



Obrázek 26 - RC člen – statická soustava druhého řádu

Vzhledem k nepřítomnosti operačního zesilovače mezi jednotlivými RC členy a možnosti vybíjení druhého RC členu přes první RC člen nejsme schopni přesně určit matematický popis regulované soustavy. Můžeme však specifikovat matematické řešení prvního RC členu:

$$Ty'(t) + y(t) = k \cdot u(t) \quad (6.1)$$

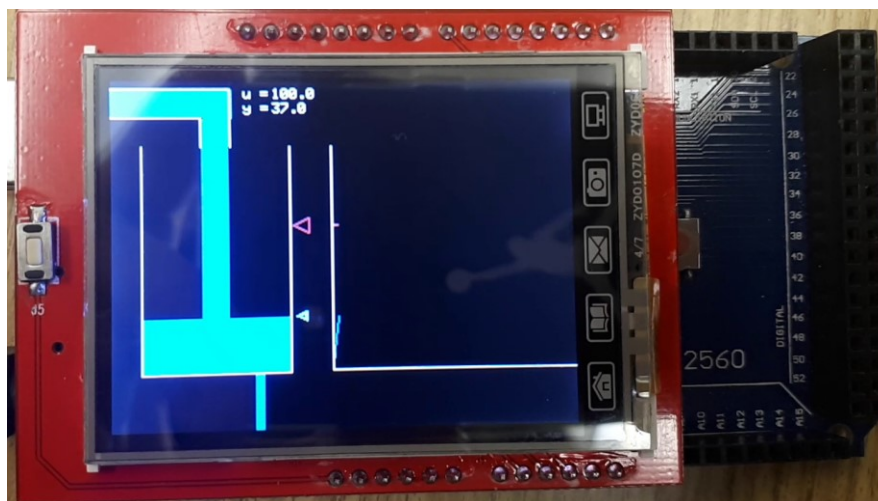
A jeho přenosovou funkci:

$$F(p) = \frac{k}{T \cdot p + 1} \quad (6.2)$$

Návrh regulované soustavy (model nádrže)

Jako další regulovaná soustava může být použit model nádrže na kapalinu, který lze realizovat také na vývojové desce Arduino. Model může fungovat ve dvou módech, a to řízený výtok (integrační člen) a volný odtok (popsán nelineární diferenciální rovnicí 1. řádu).

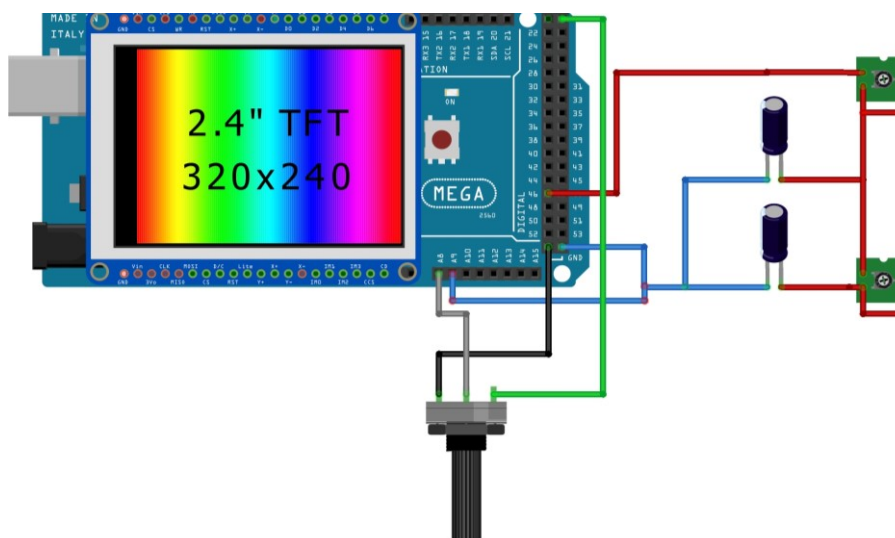
V prvním případě při připojení RC členu jsme si vystačili pouze s PWM výstupy pro kontrolu výstupního napětí na regulované soustavě. V tomto případě, chceme-li komunikovat s deskou Arduino, budeme potřebovat D/A převodník (např. MCP4921) a komunikace bude probíhat přes sběrnici SPI, kterou již Arduino disponuje.



Obrázek 27 - Vizualizace modelu nádrže

6.4 Zapojení regulátoru s regulovanou soustavou

Pro nastavování řídicí veličiny byl připojen potenciometr, kterým můžeme nastavit napětí 0-5 V. Akční zásah je připojen na digitální pin č. 46 a pomocí pulzně šířkové modulace je vysíláno napětí v rozsahu 0-5V. Zpětná vazba je připojena na analogový vstup A9.



Obrázek 28 - Schéma zapojení regulátoru s regulovanou soustavou

6.5 Softwarová realizace regulátoru

Softwarová realizace probíhala ve vývojovém prostředí Arduino IDE (integrované vývojové prostředí), toto prostředí je pro samotné programování modulů připojených k Arduinu nebo samotnou desku Arduina. Arduino IDE je napsané v jazyce Java.

Před zahájením samotného programování bylo nutné nejprve nainstalovat knihovny sloužící pro vykreslování dat na TFT displejem a čtení dotyků z dotykové vrstvy rezistivní obrazovky.

Použité knihovy:

- *Adafruit_GFX.h*
- *UTFTGLUE.h*
- *TouchScreen.h*

Celé nastavení displeje jako jeho orientace, připojené analogové piny a piny pro přenos z dotykové vrstvy jsou zobrazeny na následujícím úryvku z kódu.

```
#define TOUCH_ORIENTATION  LANDSCAPE
#define TITLE "Menu"

#include <Adafruit_GFX.h>
#include <UTFTGLUE.h>          //we are using UTFT display methods
UTFTGLUE myGLCD(0x9341, A2, A1, A3, A4, A0);

int XP = 7, XM = A1, YP = A2, YM = 6;  //most common configuration (WHITE Due)

#include <TouchScreen.h>        //Global Library
TouchScreen myTouch(XP, YP, XM, YM, 300);
TSPoint tp;                    //Touchscreen_due branch uses Point
```

Obrázek 29 - Úryvek kódu popisující nastavení knihoven a komunikace s displejem

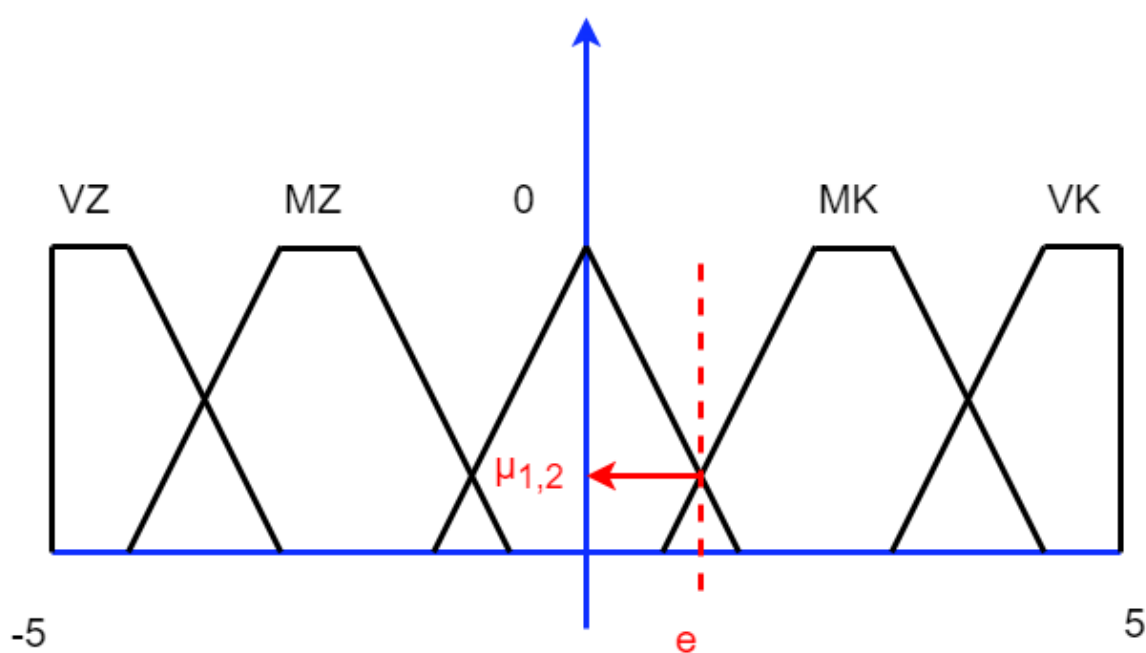
Následuje nastavení pro čtení veličin, které vstupují a vystupují do celého procesu regulace:

Zpětná vazba	pin A9
Řídicí veličina	pin A8
Akční zásah	pin (PWM) 46

Po načtení a následné normalizací (mapování) veličin, které vstupují do procesu regulace (y a w), je vypočtena regulační odchylka (e) podle vzorce zmíněném v kapitole 2. Následně je spočítána derivace neboli rychlost změny této regulační odchylky. Obě tyto hodnoty jsou zobrazeny na prvních dvou grafech a zařazeny do příslušné fuzzy množiny.

6.5.1 Použité fuzzy množiny

Na následujícím obrázku je zobrazen odečet míry příslušnosti a také jednotlivé fuzzy množiny. Rozsah fuzzy množin je $\langle -5, 5 \rangle$ bylo zvoleno 5 fuzzy množin, a to typu Π , Λ , L .



Obrázek 30 - Rozložení fuzzy množin a odečet míry příslušnosti pro množinu $\{0\}$ a $\{MK\}$

Softwarově je uložení množin v kódu řešeno pomocí pole dvourozměrného pole. Každá množina z 5 zobrazených je v poli uložena zvlášť a ukládá se vždy x-ová souřadnice. Pro množinu MZ – malá záporná pak pole v databázi vypadá takto:

$$MZ = \{-4, -3 - 2, -1\} \quad (6.3)$$

Slovní pojmenování fuzzy množin bylo zvoleno podle standardu a tak, aby prostřední nulová množina měla název 0 a odpovídala tak realitě.

VZ... Velká záporná (odchylka nebo její derivace)

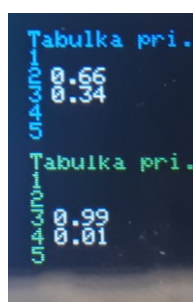
MZ... Malá záporná (odchylka nebo její derivace)

0... Nulová (odchylka nebo její derivace)

MK... Malá kladná (odchylka nebo její derivace)

VK... Velká kladná (odchylka nebo její derivace)

Po spočítání míry příslušnosti k jednotlivým množinám jsou tyto hodnoty zapsány do tabulky a vypsány na displej, jak můžeme vidět na obrázku 31.



Obrázek 31 - Vypsání míry příslušnosti na displej regulátoru

6.5.2 Způsoby sestrojení báze pravidel

Jedním způsobem, jak získat bázi pravidel je odvození z dat. V takovém případě je získán popis systému takzvanou tréninkovou množinou, z níž jsou postupně odvozovány báze pravidel. Nejčastěji se používají nejmodernější techniky jako genetické algoritmy, shluková analýza nebo neuronové sítě.

Další způsob je expertně sestrojená báze pravidel. Zde je zapotřebí experta (odborníka v dané oblasti), s jehož pomocí jsou nejprve nadefinovány bazické reálné proměnné a k nim se sestrojí odpovídající jazykové proměnné. Poté je na expertovi, aby našel všechny možné kombinace nezávislých proměnných a jim poté přiřadil jednu závislou proměnnou. Obecně se dá hovořit o jazykově orientovaném fuzzy expertním systému.

Volba báze pravidel

Při tvorbě bazových pravidel máme na výběr dvě možnosti. Buď jsou pravidla volena na základě zkušenosti experta, který je seznámen s daným regulačním problémem, nebo můžeme využít doporučených předem definovaných šablon. Oba tyto přístupy je navíc možné kombinovat.

Při návrhu pravidel pro typické regulátory P, PI, PD, PID je vhodné postupovat podle doporučených základních pravidel, za jejich pomocí jsme schopni příslušná pravidla odvodit:

- Jestliže je regulační odchylka $e(k)$ a její změna $\Delta e(k)$ nulová nebo blízká nule, potom by měl být přírůstek akční veličiny $\Delta u(k)$ nulový nebo blízký nule.
- Jestliže regulační odchylka $e(k)$ klesá k nule, nebo se blíží nule s dostačující rychlostí, pak je vhodné neměnit akční veličinu.
- Jestliže se regulační odchylka $e(k)$ vzdaluje od 0, potom je třeba akční veličinu změnit a akční zásah $\Delta u(k)$ bude nenulový. Jeho velikost a znaménko závisí na znaménku a velikosti regulační odchylky $e(k)$ a její změny $\Delta e(k)$.

		e				
		VZ	MZ	0	MK	VK
Δe	VK	0	MZ	MZ	VZ	VZ
	MK	MK	0	MZ	MZ	VZ
	0	MK	MK	0	MZ	MZ
	MZ	VK	MK	MK	0	MZ
	VZ	VK	VK	MK	MK	0

Obrázek 32 - Doporučená báze pravidel pro fuzzy PI a PD regulátor

Modrá skupina

Odchylka $e(k)$ i její rychlost $\Delta e(k)$ je buď to nulová nebo velmi malá, ať už kladná nebo záporná. Z čehož vyplývá, že skutečná hodnota se pohybuje v blízkosti žádané hodnoty. Změny akční veličiny proto budou minimální. Můžeme proto říct, že tato skupina pravidel řeší ustálený stav.

Zelená skupina

Při této variantě je odchylka záporná a její změna je kladná. Z toho vyplývá, že skutečná hodnota se pohybuje směrem k žádané hodnotě. Velikost akčního zásahu tedy musí být úměrná rychlosti tohoto pohybu.

Žlutá skupina

Odchylka se pohybuje ve velkých kladných hodnotách a zároveň rychlost její změny v záporných hodnotách, volíme proto malý zásah, buď to kladný nebo záporný.

Červená skupina

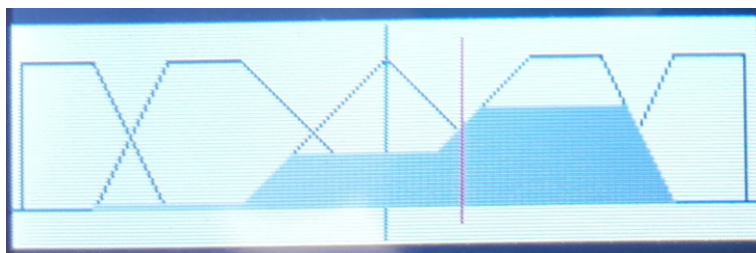
Tato skupina se nachází v rozích inferenční tabulky a akční zásah je volen jako velký kladný v případě, že je odchylka záporná a její rychlost taktéž. Naproti tomu v opačném rohu tabulky je regulační odchylka kladná stejně jako její změna volíme proto akční zásah záporně.

6.5.3 Určení akčního zásahu

Z inferenční tabulky popsané v předchozí podkapitole 6.5.2 jsme dostali výsledné fuzzy množiny podle daných pravidel. Zpravidla jsou to dvě až tři výsledné fuzzy množiny, které nám pomohou určit výsledný akční zásah u .

Výsledná míra příslušnosti je určena podle takzvaného pravidla MIN/MAX popsaného v [17]. Nalezení výstupních množin pro dvourozměrnou závislost a jedno rozhodovací pravidlo vychází z pravidla, že pokud se pravidla překrývají, pak každé pravidlo v antecedentu vygeneruje svou individuální výstupní fuzzy množinu, které se také překrývají a vybíráme podle Mamdaniho minimum (vazbou v části IF – antecedentu je operátor AND). Je-li tato vazba OR, pak vybíráme MAXIMUM z odpovídajících funkcí příslušnosti.

Výsledná fuzzy množina pak může vypadat například:



Obrázek 33 - Ukázka výsledné fuzzy množiny pro výpočet akčního zásahu

Jednotlivé vykreslení zašedlých oblastí, které můžeme vidět na obrázku 33, probíhá softwarově jako vykreslování po jednotlivých čarách, které jsou vrstveny na sebe. Počet čar je vždy spočítán z výsledné míry příslušnosti dané množiny. Vzhledem k limitujícím možnostem displeje musí být graf při každé změně vždy znovu přepočten a překreslen, což má za následek znatelné zpomalení celé regulace.

Známe-li plochu jednotlivých fuzzy množin a jejich meze, lze spočítat pomocí momentu polohu těžiště všech ploch dohromady. (viz kapitola 4.6 – Metoda středu plochy). Výsledný akční zásah poté musí projít demoralizací (přepočítání na napěťovou úroveň 0-5V).

6.5.4 Volba PI nebo PD fuzzy regulace

Jak vyplývá z obrázku 21 a 22 fuzzy PI a PD regulace je stejná, liší se ve výsledném akčním zásahu (Δu). Regulátor realizovaný v této práci umožňuje obě tyto možnosti, a to pouhým přepnutím pomocí dotykového displeje. Je-li regulátor zapnut do modu PI výsledný akční zásah má tvar takzvaně přírůstkový:

$$u = u + \Delta u \quad (6.4)$$

Je-li regulátor přepnut do modu PD, v něm je výsledný akční zásah vždy roven x-ové hodnotě těžiště vypočtený z výsledné fuzzy množiny.

Podmínka pro omezení výstupu

Jelikož výsledný akční zásah je napětíového charakteru, to znamená, že na výstupním pinu Arduina nemůže být ani nižší napětí než 0, ani vyšší než 5 V je zde použita omezující podmínka, aby nedocházelo k integraci do nekonečna. Softwarovou implementaci omezovací podmínky můžeme vidět na ukázce z kódu:

```
if (rid == 1)
{
    u = (100*mapf(tez, -100, 100, -1, 1));

    myGLCD.setColor(255, 255, 255);
    myGLCD.drawRect(295, 160, 315,180);
    myGLCD.print("PI", 300, 165);

    myGLCD.setColor(255, 0, 0);
    myGLCD.drawRect(295, 210, 315,230);
    myGLCD.print("PD", 300, 215);

}

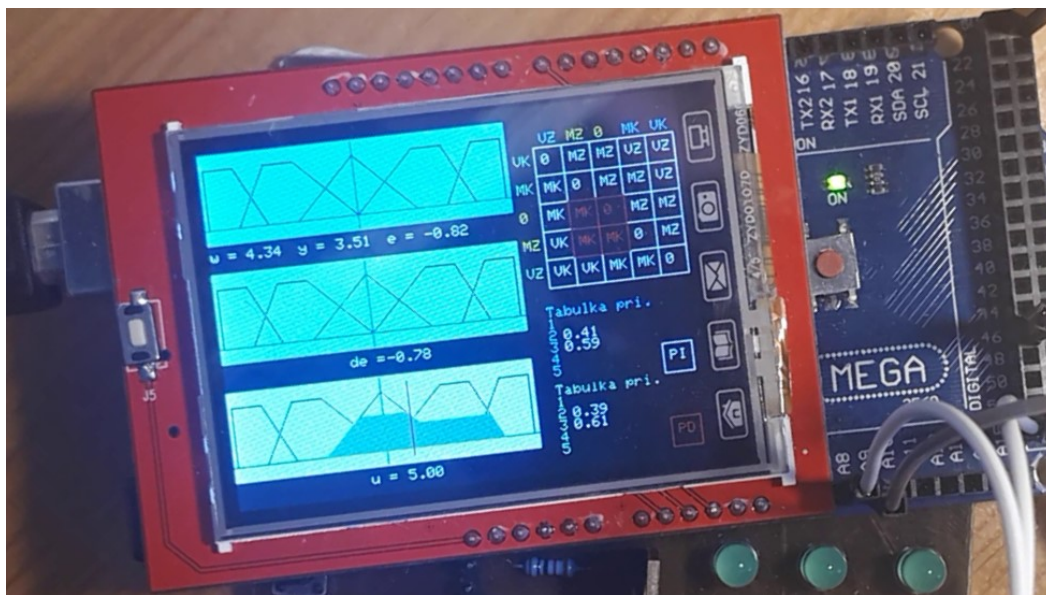
if(u>5) u = 5;
if(u<0) u=0;
```

Obrázek 34 - Softwarové omezení přetečení výsledného akčního zásahu

7. Ukázka fungování regulátoru

V této kapitole je popsána práce s regulátorem a vysvětlena jeho funkčnost jeho regulace na konkrétním příkladu.

PD fuzzy regulátor



Obrázek 35 - Ukázka regulace PD

Postup:

- 1) Potenciometrem nastavíme požadovanou hodnotu (hodnotu můžeme vidět v pravém horním rohu jako w)
- 2) Stiskneme dotykový display v místě symbolu „domečku“ a přepneme tak regulátor do modu PD
- 3) Regulátor spočítá regulační odchylku a vykreslí ji do příslušné fuzzy množiny (V tomto případě je to 2. množina \rightarrow MZ s mírou příslušnosti 0,41 a 3. množina \rightarrow s mírou příslušnosti 0,59)
- 4) Spočítáme derivaci regulační odchylky ($de = -0,7$) a vykreslíme ji v druhém zeleném grafu
- 5) Určíme míry příslušnosti stejně jako v kroku 4) (2.mn \rightarrow 0,39 a 3. mn \rightarrow 0,61)

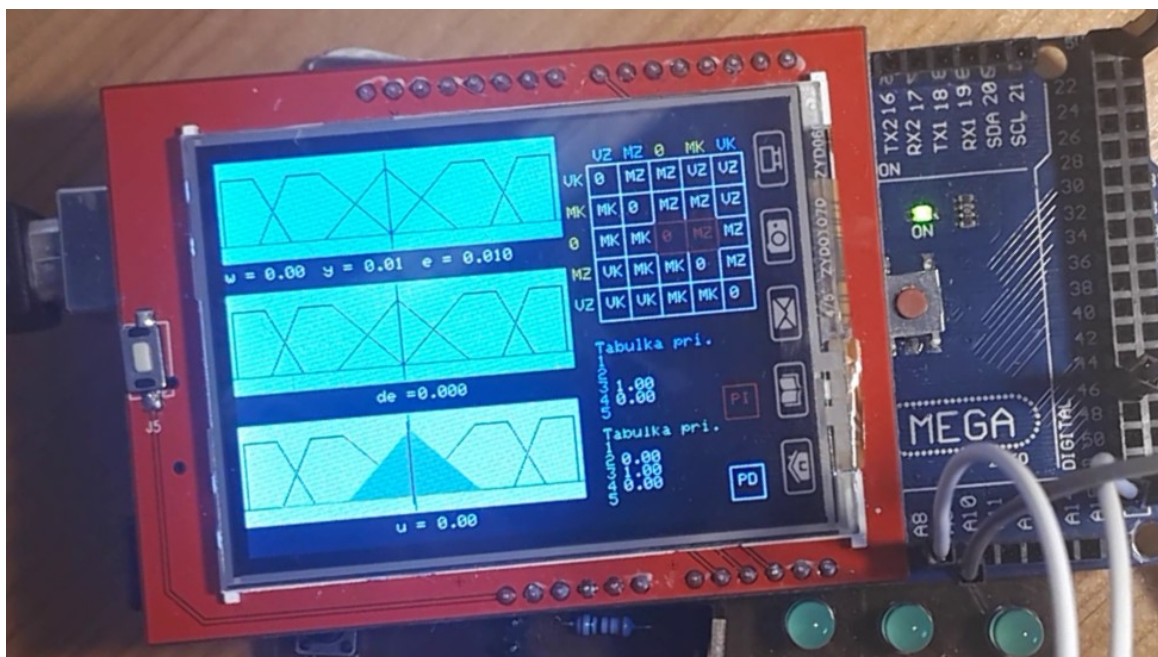
- 6) Přes inferenční pravidla zjistíme výsledné množiny (MK a 0)
- 7) Pomocí metody min/max zjistíme míry příslušnosti výsledné množiny (MK $\rightarrow 0,41$ a pro 0 $\rightarrow 0,59$)
- 8) Vykreslíme příslušný počet šedých čar a spočítáme těžiště (asi 1,5)
- 9) Přepočtem a denormalizací zjistíme akční zásah, který je v tomto případě 5V

Na následujícím obrázku je zobrazen celý průběh PD regulace. Regulátor nikdy nedosáhne toho, aby regulační odchylka byla nulová, je to způsobeno tím, že v regulované soustavě dochází neustále ke ztrátám. Další ztráty napětí, které jsou způsobeny, jsou ztráty na vedení a dále pak rychlost regulátoru není dostatečně vysoká. Citlivost regulátoru je v oblasti „0“ velmi nízká, proto regulátor pouze kmitá kolem požadované hodnoty napětí s $\Delta e = <-0,4$ do $0,4>$.



Obrázek 36 - Zobrazený průběh regulace na displeji regulátoru (zleva)

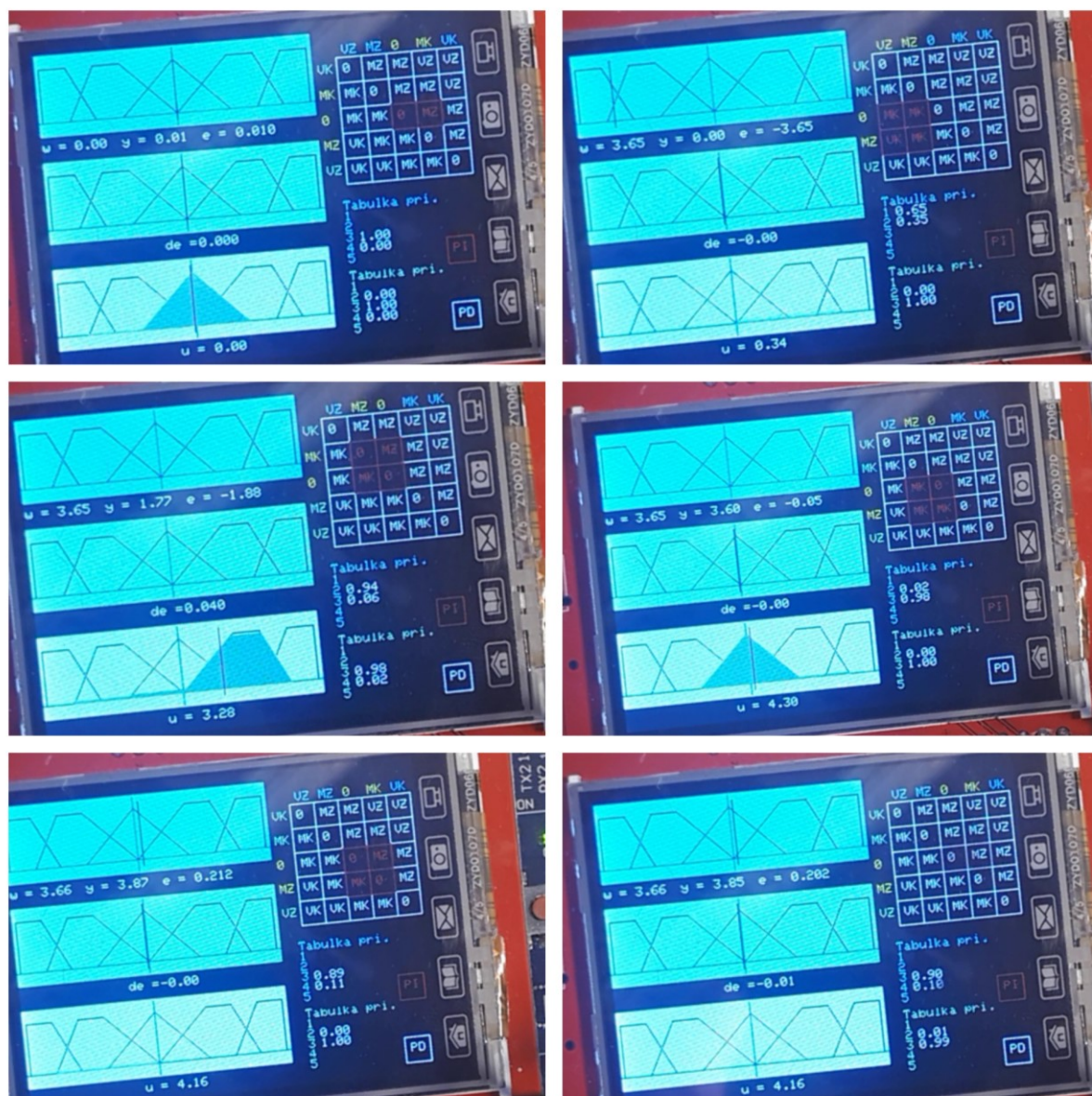
PI fuzzy regulátor



Obrázek 37 - Regulátor v módu PI před zadáním řídicí veličiny

- 1) Potenciometrem nastavíme požadovanou hodnotu (hodnotu můžeme vidět v pravém horním rohu jako w)
- 2) Stiskneme dotykový display v místě symbolu „domečku“ a přepneme tak regulátor do modu PD
- 3) Regulátor spočítá regulační odchylku a vykreslí ji do příslušné fuzzy množiny
- 4) Spočítáme derivaci regulační odchylky a vykreslíme ji v druhém zeleném grafu
- 5) Určíme míry příslušnosti stejně jako v kroku 4)
- 6) Přes inferenční pravidla zjistíme výsledné množiny
- 7) Pomocí metody min/max zjistíme míry příslušnosti výsledné množiny
- 8) Vykreslíme příslušný počet šedých čar a spočítáme těžiště
- 9) Přepočtem a denormalizací zjistíme přírůstek akčního zásahu a přičteme jej k předchozí akční veličině

Na následujícím obrázku je názorně vidět průběh regulace za použití PI fuzzy regulátoru. Stejně jako předchozí PD regulátor i tento nikdy nedoreguluje požadovanou odchylku na nulu, a to ze stejného důvodu jako regulátor PD. Další nevýhodou tohoto regulátoru je, že nereaguje příliš dobře na rychlé změny řídicí veličiny. Výhodou tohoto navrhovaného regulátoru však je, že je schopen mít překmit regulační odchylky menší než regulátor PD.



Obrázek 38 - Zobrazený průběh regulace na displeji regulátoru (zleva)

8. Návrh laboratorních úloh

8.1 Laboratorní úloha s PD regulátorem

Studenti budou mít k dispozici mikrokontroler Arduino MEGA 2560 s připevněným displejem a nahráním kódem. Dále potenciometr a regulovanou soustavu v podobě RC členu. Studenti sestaví regulační obvod, jak je popsáno v této práci v kapitole 0. Připojí Arduino ke zdroji napětí a počkají až se spustí program a rozsvítí displej. Stisknou tlačítko knihy tak, aby se rozsvítil červený čtvereček s nápisem PI. Nastaví na potenciometru požadované napětí, kterého chtějí dosáhnout na soustavě (doporučuji 3,5 – 4,5 V). Nedoporučuji nastavovat vyšší napětí než 4,9 V, jelikož regulátor nebude schopen nikdy doregulovat soustavu do této napěťové úrovně. Studenti sledují průběh regulace, mohou měřit čas, kontrolují inferenční tabulku, jestli je správně interpretována a snaží se popsat fungování regulátoru. Jakmile se regulace ustálí, přestanou měřit čas, a zjistí hodnotu překmitu. To znamená o kolik se mění regulační odchylka v plusových a minusových hodnotách. Studenti sledují přírůstkovou složku regulátoru a komentují její hodnoty.

Studenti mohou zopakovat stejný postup, ale tentokrát nechají nabít kondenzátory v připojené soustavě a sledují jejich vybíjení a schopnost s jakou s dokáže regulátor poradit s kladnou regulační odchylkou.

Na závěr měření studenti zpracují protokol, kde detailně popíší průběh měření.

8.2 Laboratorní úloha s PI regulátorem

Studenti budou mít k dispozici mikrokontroler Arduino MEGA 2560 s připevněným displejem a nahráním programem. Dále potenciometr a regulovanou soustavu v podobě RC členu. Studenti sestaví regulační obvod, jak je popsáno v této práci v kapitole 0. Připojí Arduino ke zdroji napětí a počkají až se spustí program a rozsvítí displej. Stisknou tlačítko domečku tak, aby se rozsvítil červený čtvereček s nápisem PD. Nastaví na potenciometru požadované napětí, kterého chtějí dosáhnout na soustavě (doporučuji 3,5 – 4,5 V). Nedoporučuji nastavovat vyšší napětí než 4,9 V, jelikož regulátor nebude schopen nikdy doregulovat soustavu do této napěťové úrovně. Studenti sledují průběh regulace, mohou měřit

čas, kontrolují inferenční tabulku, jestli je správně interpretována a snaží se popsat fungování regulátoru. Jakmile se regulace ustálí, přestanou měřit čas, a zjistí hodnotu překmitu. To znamená o kolik se mění regulační odchylka v plusových a minusových hodnotách. Studenti sledují přírůstkovou složku regulátoru a komentují její hodnoty.

Studenti mohou zopakovat stejný postup, ale tentokrát nechají nabít kondenzátory v připojené soustavě a sledují jejich vybíjení a schopnost s jakou si dokáže regulátor poradit s kladnou regulační odchylkou.

Na závěr měření studenti zpracují protokol, kde detailně popíší průběh měření.

8.3 Návrhy další laboratorních úloh

K těmto úlohám již budeme potřebovat počítač s vývojovým prostředím Arduino IDE a kódem programu vytvořeným v této práci. Studenti si budou moci vyzkoušet změnit fuzzy množiny tím, že změní x-ové souřadnice jednotlivých fuzzy množin v poli.

```
int pole [5][4] = {  
    {-5,-5,-4,-3},  
    {-4,-3,-2,0},  
    {-2,0,0,2},  
    {0,2,3,4},  
    {3,4,5,5}  
};
```

Obrázek 39 - Ukázka místa v kódu pro změnu fuzzy množin

Navrhují zkusit všechny množiny jako funkce Λ .

Dále studenti mohou zkusit upravit citlivost regulátoru změnou parametrů, kterými probíhá denormalizace. Tyto parametry se v kódu nacházejí viz obrázek 40.

```

if (rid == 0)
{
    u = u + (0.1*mapf(tez, -100, 100, -1, 1));

    myGLCD.setColor(255, 0, 0);
    myGLCD.drawRect(295, 160, 315,180);
    myGLCD.print("PI", 300, 165);

    myGLCD.setColor(255,255,255);
    myGLCD.drawRect(295, 210, 315,230);
    myGLCD.print("PD", 300, 215);
}
if (rid == 1)
{
    u = (100*mapf(tez, -100, 100, -1, 1));

    myGLCD.setColor(255, 255, 255);
    myGLCD.drawRect(295, 160, 315,180);
    myGLCD.print("PI", 300, 165);

    myGLCD.setColor(255, 0, 0);
    myGLCD.drawRect(295, 210, 315,230);
    myGLCD.print("PD", 300, 215);
}

```

Obrázek 40 - Ukázka kódu pro změnu parametrů citlivosti regulátoru

Poslední návrh laboratorní úlohy může být připojení jiné než statické soustavy druhého řádu tvořené dvěma RC členy. Například soustavy prvního řádu.

9. Závěr

Při realizaci mé diplomové práce jsem si dal za cíl vytvořit fuzzy regulátor jenž by byl realizovatelný v laboratorních podmínkách. Při práci na teoretickém rozboru jsem zjistil, že již existuje celá řada různě průmyslově využívaných regulátorů ať už přímo jako součást PLC nebo jako samostatné kontroléry. Ale nenalezl jsem však studii, nebo odbornou práci, která by se zabývala realizací regulátoru na vývojové desce Arduino a která by zároveň byla přizpůsobena tak, aby mohla sloužit jako přehledná výuková ukázka strategie práce regulátoru. Tento vývojový mikropočítač mi vzhledem k povaze práce, která byla vytvořit regulátor pro laboratorní a výukové účely, přišel jako nejvhodnější. Jeho hlavní výhody jsou snadná dostupnost, nízká cena, lehká programovatelnost a rozšiřitelnost pomocí tzv. Arduino shieldů. Všechny tyto důvody staví Arduino do pozice absolutního lídra, co se týká pozice na trhu s vývojovými deskami. Největší nevýhoda těchto desek je ne až tak dobrá průmyslová využitelnost právě kvůli jednoduchosti a nenáročnosti. Pro výukové účely je však naprosto dostačující.

V mé práci jsem tak realizoval fuzzy PI a PD regulátor za použití Arduina MEGA 2560. Jako zobrazovací a ovládací panel jsem použil 2.4“ LCD TFT displej. Studenti tak při práci s mnou navrženým a realizovaným regulátorem mohou sledovat změnu veličin, zařazení do jednotlivých fuzzy množin, průchod přes tabulku inferenčních pravidel a následnou defuzifikaci v reálném čase. Jako testovací regulovaná soustava byla použita statická soustava druhého řádu tvořena dvěma RC členy. Náročnost celého zapojení je dostačující pro studenty bakalářského studia, pro které byly mnou navrženy laboratorní úlohy v poslední části mé práce.

Původní záměr realizace mé diplomové práce byl společný s druhou diplomovou prací – modely soustav na Arduinu. Tato práce však zatím nebyla realizována, a proto jsem vytvořil i dva modely soustavy nádrže na kapalinu pro úlohu regulace hladiny. V tomto případě je nutno výstupy Arduina opatřit D/A převodníky. Navrhl jsem řešení s D/A převodníky, které komunikují s Arduinem pomocí SPI.

Závěrem bych rád navrhnul vylepšení navrženého regulátoru do budoucna, aby ještě lépe využitelný pro výukové účely. Implementace většího displeje s větším rozlišením by pomohla vyřešit problém s malou zobrazovací a dotykovou plochou, kterou skýtá mnou použitý 2,4“ displej. Dále by zde mohla být možnost přímo si zvolit dané fuzzy množiny a parametry regulátoru. V neposlední řadě by mohla být provedena implementace regulace na jiné než mnou testované soustavě. Jediná podmínka, kterou soustava musí splňovat, a to být řízena napětím 0-5V a její výstupy musí rovněž poskytovat signál v rozmezí napětí 0-5V.

Použitá literatura

- [1] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-730-0020-2.
- [2] VISIOLI, Antonio. *Practical PID control*. 1. London: Springer, 2006. ISBN 18-462-8585-2.
- [3] OŽANA, Štěpán. *Navrhování a realizace regulátorů: učební text*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2605-9.
- [4] PROKOP, Roman, Radek MATUŠŮ a Zdenka PROKOPOVÁ. *Teorie automatického řízení - lineární spojité dynamické systémy*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2006. ISBN 80-731-8369-2.
- [5] ŠULC, Bohumil a Miluše VÍTEČKOVÁ. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3007-5.
- [6] Jak nastavit PI - PID regulátor. *Pohonnatechnika.cz* [online]. Česká republika: Pohonnatechnika.cz, 2018 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/pid-regulator>
- [7] *Základy fuzzy logiky pro řízení a modelování* [online]. VUT Brno: JURA P., 2014 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-3019-2.pdf>
- [8] ZADEH, L.A. Fuzzy sets. *Inf. & Control. Information and Control* [online]. 1965, **8**(3), 338-353 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: .[cit. 2015-03-21]. <http://www.cs.berkeley.edu/~zadeh/papers/Fuzzy%20Sets-Information%20and%20Control-1965.pdf>
- [9] KALUŽA, R. Fuzzy logika. *Radovan.blogger.cz* [online]. blog: radovan.blogger.cz, 2006 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://radovan.blogger.cz/IT-internet/Fuzzy-logika>
- [10] *Nehierarchické metody shlukování* [online]. BRNO: Masarykova univerzita, 2010 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/172767/fi_b/5739129/web/web/nehiermet.html

- [11] *Základy fuzzy množin* [online]. Praha: ČVUT, 2002 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z:
<http://petr.olsak.net/ftp/olsak/fuzzy/fuzzy.pdf>
- [12] MACHŮ, Hana. *Fuzzy regulátor* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z:
https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109057/MAC784_FMMI_N3922_3902T042_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiřímu David, Ph.D.
- [13] *Optimalizace návrhu fuzzy řízení vzhledem k rozsahu ohybů paralelního mechanismu*. [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=56625.
Disertační práce. Vysoké učení technické Brno.
- [14] *Rozhodovací systémy při posuzování technického stavu kolejových vozidel* [online]. Ostrava: Institut dopravy FS, VŠB-TU Ostrava, 2002 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z:
www: <http://www.railvolution.net/czechraildays/2002/seminare/nt33.pdf>
- [15] *Mamdani Fuzzy Model* [online]. unknown: Research Hub, 2015 [cit. 2018-04-11].
Dostupné z: <http://researchhubs.com/post/engineering/fuzzy-system/mamdani-fuzzy-model.html>
- [16] *Fuzzy-Control of a Model Helicopter* [online]. Zurich: Institut fur Automatik, 2010 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://control.ee.ethz.ch/~ifa-fp/wiki/index.php?n=Main.FuzzyHeli>
- [17] MODRLÁK, CSC., Doc. Ing. Osvald. FUZZY ŘÍZENÍ A REGULACE. *Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií* [online]. Liberec: TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, 2002 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z:
<https://www.kirp.chtf.stuba.sk/~bakosova/wwwRTP/tar2fuz.pdf>
- [18] ARDUINO MEGA 2560. *RoboTEK* [online]. Pakistán: RoboTEK, 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.robotek.pk/product/arduino-mega-2560/>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Funkční schéma regulátoru	- 11 -
Obrázek 2 - Zjednodušené blokové schéma regulátoru.....	- 12 -
Obrázek 3 - Přechodová charakteristika P složky	- 13 -
Obrázek 4 - Přechodová charakteristika I členu	- 14 -
Obrázek 5 - Přechodová charakteristika D členu.....	- 14 -
Obrázek 6 - Schéma ideálního PID regulátoru [1]	- 16 -
Obrázek 7 - Obdélníkové metody [3]	- 19 -
Obrázek 8 - Odečtení periody netlumených kmitů při kritickém zatížení.....	- 21 -
Obrázek 9 - Srovnání klasické a fuzzy množiny	- 24 -
Obrázek 10 - Regulační obvod s rozkresleným fuzzy regulátorem [12]	- 25 -
Obrázek 11 - Fuzzifikace pomocí singletonu	- 26 -
Obrázek 12 - Tvar L-funkce	- 27 -
Obrázek 13 - Γ -funkce	- 27 -
Obrázek 14 - Tvar Λ - funkce.....	- 28 -
Obrázek 15 - Tvar Π -funkce.....	- 29 -
Obrázek 16 - Metoda středu plochy.....	- 31 -
Obrázek 17 - Metoda středu součtů	- 32 -
Obrázek 18 - Metoda průměru středů	- 33 -
Obrázek 19 - Metody nejvýznamnějšího maxima	- 34 -
Obrázek 20 - Blokové schéma fuzzy P regulátoru	- 36 -
Obrázek 21 - Blokové schéma PI regulátoru	- 37 -
Obrázek 22 - Blokové schéma PD regulátoru	- 38 -
Obrázek 23 - Blokové schéma fuzzy PID regulátoru	- 39 -

Obrázek 24 - Vývojová deska Arduino MEGA 2560 s popisem jednotlivých vstupně výstupních pinů [18]	- 41 -
Obrázek 25 - Zapojení LCD TFT shieldu do vývojové desky Arduino	- 42 -
Obrázek 26 - RC člen – statická soustava druhého řádu	- 43 -
Obrázek 27 - Vizualizace modelu nádrže	- 44 -
Obrázek 28 - Schéma zapojení regulátoru s regulovanou soustavou	- 44 -
Obrázek 29 - Úryvek kódu popisující nastavení knihoven a komunikace s displejem	- 45 -
Obrázek 30 - Rozložení fuzzy množin a odečet míry příslušnosti pro množinu {0} a {MK}	- 46 -
Obrázek 31 - Vypsání míry příslušnosti na displej regulátoru	- 47 -
Obrázek 32 - Doporučená báze pravidel pro fuzzy PI a PD regulátor	- 49 -
Obrázek 33 - Ukázka výsledné fuzzy množiny pro výpočet akčního zásahu.....	- 50 -
Obrázek 34 - Softwarové omezení přetečení výsledného akčního zásahu	- 51 -
Obrázek 35 - Ukázka regulace PD.....	- 52 -
Obrázek 36 - Zobrazený průběh regulace na displeji regulátoru (zleva).....	- 53 -
Obrázek 37 - Regulátor v módu PI před zadáním řídicí veličiny	- 54 -
Obrázek 38 - Zobrazený průběh regulace na displeji regulátoru (zleva).....	- 55 -
Obrázek 39 - Ukázka místa v kódu pro změnu fuzzy množin.....	- 57 -
Obrázek 40 - Ukázka kódu pro změnu parametrů citlivosti regulátoru.....	- 58 -